

Gerhard Girmscheid

Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse

4. Auflage



Springer

v/d/f

VDI

Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse

Gerhard Girmscheid

Leistungsermittlungshand- buch für Baumaschinen und Bauprozesse

4. Auflage



Springer



Gerhard Girmscheid
ETH Zürich
Institut für Bau- und
Infrastrukturmanagement
Wolfgang-Pauli-Str. 15
8093 Zürich
Schweiz
girmscheid@ibi.baug.ethz.ch

ISBN 978-3-642-13794-5 Springer Heidelberg Dordrecht London New York
ISBN 978-3-7281-3345-8 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

e-ISBN 978-3-642-13795-2
DOI 10.1007/978-3-642-13795-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2004, 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur dritten Auflage

Der wirtschaftliche, leistungsfähige, hoch mechanisierte Baubetrieb ist durch den optimalen Einsatz der Geräte und Bauhilfsmaterialien in einer Leistungserstellungsprozesskette für die jeweilige baubetriebliche Aufgabenstellung gekennzeichnet. Die Wahl der Geräte wird sowohl durch technische Gegebenheiten wie auch durch wirtschaftliche Gesichtspunkte geprägt. Die wirtschaftlichen Aspekte ergeben sich aus der Marktlage und den strategischen Unternehmenszielen. Daraus resultieren die unternehmensspezifische Art der Gerätebereitstellung, das Service- und Bauhofkonzept sowie die Finanzierung [1].

Die Leistungsermittlung von Einzelgeräten [2], eingebettet in Teil- und Gesamtprozesse, ist die Grundlage für die Auswahl und Anzahl der Leistungsgeräte, um die projektspezifischen Leistungsziele zu erreichen, und dient zudem als unverzichtbare Basis der Termin- und Kostenplanung (Kalkulation) sowie des Controllings. Daher kommt der Leistungsermittlung als Basis einer systematischen, ergebnisorientierten Kalkulation, die in meinem neuen Buch "Risikobasierte Kostenkalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen" ausführlich behandelt wird, grösste Bedeutung zu; sie ist somit Grundlage einer ergebnisorientierten, effizienten Baustellenvorbereitung.

Dieses ursprünglich aus meinen Vorlesungen an der ETH Zürich entstandene Handbuch liegt nun, angeregt durch die grosse Resonanz auf die ersten beiden Auflagen, in der dritten, vollständig überarbeiteten und teilweise erweiterten Auflage vor. Es soll angehenden Bauingenieurinnen und -ingenieuren in der Arbeitsvorbereitung und Bauausführung sowie Maschineningenieurinnen/-ingenieuren in den Bau-/Werkhöfen als Nachschlagewerk dienen, um Leistungsermittlungen im Baubetrieb vorzunehmen. Dazu wird ein analytisches Grundkonzept zur Leistungsermittlung von Baugeräten sowie der Produktionsketten von parallelen und hintereinander geschalteten Geräten unterschiedlicher Teilprozesse vorgestellt. Gegenüber der zweiten Auflage wurde die Flüssigkeitsförderung in Kapitel 4 um eine Beispielrechnung für die Dimensionierung der Flüssigkeits-Feststoff-Förderung ergänzt und das Jetgrouting in Kapitel 6 um die Berechnung der erforderlichen Pumpenleistung erweitert. In der Regel werden in diesem Buch keine "Standardwerte", sondern die elementaren analytischen Zusammenhänge angegeben.

Nichts ist perfekt - der Autor weiss, dass ein solches Handbuch weiterentwickelt werden muss und erwartet gerne konstruktive Kritik. So haben aufmerksame Leser auf Fehler in den beiden früheren Ausgaben hingewiesen, die nun berichtigt wurden.

Auch bei dieser dritten Auflage möchte ich meinen Mitarbeitern am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Busch, danken, die mit ihrer engagierten Unterstützung dazu beigetragen haben, das Buch in dieser Qualität herzustellen.

Zürich, Januar 2004

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorwort zur vierten Auflage

Das Handbuch wurde von den Nutzern und vom Autor auf mögliche Unstimmigkeiten überprüft und korrigiert. Hier meinen besonderen Dank an die Nutzer. In dieser Auflage wurden die Transportsysteme LKW, SKW und Dumper sowie die Flüssigkeitsförderung überarbeitet. Die jetzige Fassung dient als umfassende Formelsammlung zur Leistungsermittlung und zur Konfiguration des Bauprozesses des Hoch-, Tief-, Spezialtief-, Tunnel-, Brückenbaus und des Rohrvortriebs.

Ich wünsche allen Nutzern viel Erfolg bei der Gestaltung von Produktionsprozessketten und bei deren Leistungsbestimmung.

Zürich, März 2010

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Haftungsausschluss

Die Angaben in diesem Buch wurden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt, allerdings übernimmt der Autor keine Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder sonstige Qualität der bereitgestellten Informationen. Haftungsansprüche gegen den Autor, die sich auf Schäden materieller oder ideeller Art beziehen, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der in diesem Buch enthaltenen Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter und/oder unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen, sofern seitens des Autors kein nachweislich vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verschulden vorliegt.

Inhaltsverzeichnis

1	LEISTUNG IM BAUBETRIEB.....	1
1.1	Leistungsbegriffe	2
1.2	Bestimmung von Leistungswerten.....	8
1.3	Leistung von Produktionsketten	10
1.4	Allgemeine Leistungsberechnung von Baugeräten	11
2	BAUSTELLENEINRICHTUNGEN	19
2.1	Sozialeinrichtungen	20
2.2	Wasserversorgung	21
2.3	Stromversorgung	27
2.4	Druckluftversorgung	41
2.5	Separationsanlagen	48
3	ERDBAUGERÄTE	55
3.1	Hydraulikbagger	56
3.2	Radlader	62
3.3	Laderaupe	65
3.4	Planiergeräte	68
3.5	Verdichtungsgeräte	83
4	TRANSPORTGERÄTE	91
4.1	LKW; SKW; Dumper	92
4.2	Gleisförderung	112
4.3	Bandförderung	123
4.4	Flüssigkeitsförderung	128
4.5	Schneckenförderung	166

5	TUNNELBAUGERÄTE	173
5.1	Tunnelbohrmaschinen	174
5.2	Teilschnittmaschinen	181
5.3	Bohrmaschinen	186
5.4	Bohren und Sprengen einer Ortsbrust.....	189
5.5	Lüftung	192
6	SPEZIALTIEFBAU.....	201
6.1	Jetgrouting.....	202
6.2	Rammen.....	211
7	HOCHBAU	231
7.1	Krane	232
7.2	Betonanlagen	235
7.3	Stahlbetonarbeiten	240
8	FAKTOREN	249
9	Literaturverzeichnis	281
10	Abbildungsverzeichnis	287
11	Tabellenverzeichnis	291
12	Stichwortverzeichnis	295

1 Leistung im Baubetrieb

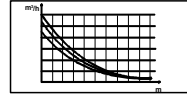
Leistungsbegriffe

Bestimmung von Leistungswerten

Leistung von Produktionsketten

Allgemeine Leistungsberechnung von Baugeräten

Leistung im Baubetrieb



1.1 Leistungsbegriffe

Um Bauverfahren zu bewerten und anschliessend **Bauzeit und Baukosten** festlegen zu können, müssen Leistungswerte für einzelne Baumaschinen sowie ganze Prozessketten bekannt sein. Einheitliche und konsistente Definitionen der für die Leistungsberechnung relevanten Begriffe sind notwendig, um Angaben und Ergebnisse untereinander vergleichbar zu machen.

Als **Leistung** bezeichnet man Arbeit pro Zeiteinheit, wobei unter Arbeit in der Regel eine hergestellte, gelieferte oder beförderte Menge verstanden wird [3].

$$\text{Leistung} = \frac{\text{hergestellte Menge}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Der Begriff Menge [3]

Im Baubetrieb häufig verwendete Mengen sind z.B.

- Aushub von Bodenmasse in m^3
- Herstellen von Wandschalung in m^2
- Verlegen von Betonstahl in t

oder bei Betrachtung einer vom Bauherrn geforderten Gesamtleistung

- Herstellen einer Fertiggarage in Stück
- umbauter Raum im Hochbau in m^3

Da diese Mengengriffe nicht präzise genug sind, müssen sie in der Regel genauer definiert werden. So kann im **Erdbau** ein m^3 bedeuten:

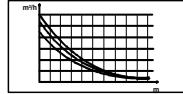
- fm^3 Material in ungestörter, natürlicher Lagerung
- lm^3 Material in aufgelockertem Zustand, z.B. auf einer LKW-Mulde
- fm^3 Material in wieder eingebautem, verdichtetem Zustand

Ein m^3 **Beton** kann aufgefasst werden als:

- m^3 trockenes Gemisch aus Zuschlagstoffen und Zement
- m^3 unverdichteter Frischbeton
- m^3 verdichteter, abgebundener Beton

Betongüte, Art der Zuschlagstoffe und des Zements, Wassergehalt sowie Verarbeitungsverfahren sind allerdings noch nicht präzisiert.

Leistung im Baubetrieb



Neben der Menge ist auch die der Berechnung zugrunde liegende **Zeiteinheit** des Leistungsbegriffs zu definieren. Einzelne Arbeitsabläufe einer Zeitstudie, wie z.B. das Arbeitsspiel t_s eines Ladegeräts, werden in Minuten angegeben. Im Baubetrieb nutzt man als Zeiteinheiten Stunden, Tage und Monate für die summarische Arbeits-, Einsatz- und Vorhaltezeit. Es bereitet allerdings häufig Schwierigkeiten, Anfang und Ende des zu betrachtenden Zeitraums festzulegen und anzugeben. So stellt sich die Frage, ob zwischen Beginn und Ende der gesamte Zeitraum erfasst oder Teile ausgenommen werden sollen (z.B. die Aufbau-, Abbau- und Einsatzzeit oder nur die Betriebszeit des Geräts).

Auf Baustellen wird in der Regel ohne Schichtbetrieb, allerdings mit Überstunden gearbeitet. Daher kann man die Arbeitszeit wie folgt ansetzen:

1 Tag = 8 – 10 Arbeitsstunden

Im Untertagebau [2] oder bei Instandsetzungsarbeiten von Fernstrassen kommt meistens der Schichtbetrieb zum Einsatz, wobei die Schichtarbeitszeiten oben genannten Arbeitszeiten entsprechen.

Zeitbegriffe für Baugeräteeinsatz und -bewertung

Bei der Beurteilung von **Baugerätekosten** ist zwischen Betriebszeit, Einsatzzeit und Vorhaltezeit zu unterscheiden (Bild 1-1). Man definiert vereinfacht:

- **Betriebszeit** = reine Arbeitszeiten des Geräts einschliesslich der Umsetzzeiten innerhalb des Arbeitsbereichs.
- **Einsatzzeit** = Betriebszeit, Vorbereitungszeiten (z.B. Auslegen von Baggermatratzen) und Einarbeitungszeiten, Umsetzzeiten innerhalb der Baustelle, betrieblich bedingte Wartezeiten und Zeiten für den Abschluss der Arbeiten.
- **Vorhaltezeit** = Einsatzzeit, Zeiten für An- und Abtransport sowie (falls erforderlich) Auf-, Um- und Abbaupzeiten, Stillliegezeiten auf der Baustelle, Zeiten für Wartung, Pflege und Reparatur. Die Vorhaltezeit ist damit die Zeitspanne, in der ein Gerät einer Baustelle zur Verfügung steht und anderweitig nicht darüber verfügt werden kann [4].

Leistung im Baubetrieb

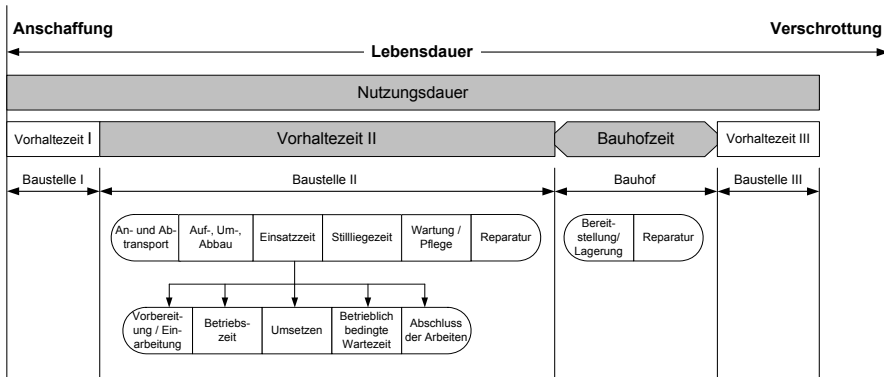
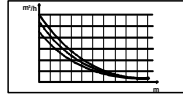


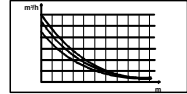
Bild 1-1: Zeitbegriffe für Baugeräteeinsatz und -bewertung nach [4]

Die Geräte- und Energiekosten für Bereitstellungsgeräte (z.B. Krane) berechnen sich nach der Dauer der Vorhaltezeit. Die Gerätekosten für Leistungsgeräte (z.B. Bagger) berechnet man oft nach der Dauer der Einsatz- bzw. Betriebszeit und den Energieverbrauch nach der Betriebszeit. Eine Berechnung der Gerätekosten von Leistungsgeräten über die Vorhaltezeit führt allerdings dazu, dass der Baustelleneinsatz dieser Geräte möglichst kurz gehalten wird, da in diesem Fall auch nicht arbeitende Leistungsgeräte Kosten verursachen. Somit wird die Bauleitung angehalten, die Einsätze von Leistungsgeräten effizient zu gestalten und bei beendetem Einsatz die Geräte zügig anderen Baustellen zur Verfügung zu stellen. Als Mass der Effizienz dient in diesem Fall der Quotient aus Betriebs- und Vorhaltezeit.

Die **Ermittlung der Arbeitsleistung** einer **Person** oder einer **Maschine** und der Vergleich mit anderen Leistungen setzen voraus, dass die beeinflussenden **Randbedingungen** erfasst und genormt sind [3]. Die theoretische Grundleistung Q_0 muss aufgrund verschiedener, zum Teil interaktiver Einwirkungen auf die Nutzleistung Q_N abgemindert werden. Diese Reduktionsfaktoren setzen sich aus folgenden Einflussbereichen [5] zusammen:

- den humanen Faktoren (Qualifikation und Motivation der Maschinisten)
- den organisatorischen Faktoren (Qualifikation der Bauleitung und Arbeitsvorbereitung zur Gestaltung organisatorischer Abläufe)
- den technischen Faktoren (an die Aufgaben angepasstes Gerät sowie technischer Zustand)

Leistung im Baubetrieb



- den umweltbedingten Faktoren (Wetter, Temperatur, Bodenzustand etc.)

Die humanen, organisatorischen und umweltbedingten Faktoren setzen sich z.B. zusammen aus:

- dem **Bedienungsfaktor** η_1 [-]. Dieser reflektiert die humanen Faktoren der Ausbildung und der Qualifikation des Beschäftigten und seine Leistungsmotivation in Abhängigkeit von Lohn, Prämien und persönlichem Einsatz [3].

Tabelle 1-1: Werte für Bedienungsfaktoren η_1 [-] [3]

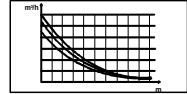
Ausbildung und Qualifikation	Leistungsmotivation	η_1
sehr gut (geübt)	sehr gut (100 %)	1.00
durchschnittlich	gut (90 %)	0.80
sehr gut (geübt)	ausreichend	0.75

Interpretiert man die untere Zeile der Tabelle 1-1, so führt bei einem sehr guten Baggerfahrer ein Absinken der Leistungsmotivation von „sehr gut“ auf „ausreichend“ zu einem Leistungseinbruch von 25 %. Es ist allerdings nicht einfach, einen allgemeingültigen Bezugswert z.B. für einen sehr gut ausgebildeten und qualifizierten sowie sehr hoch motivierten Baggerfahrer festzulegen, weshalb sich die Auswahl der passenden Beiwerte für die menschliche Arbeitsleistung in der Leistungsberechnung als schwierig erweist.

- den **Betriebsbedingungen** η_2 [-]. Diese reflektieren die organisatorischen und umweltbedingten Faktoren wie die Einsatzbedingungen (Wetter, Helligkeit, örtliche Gegebenheiten wie z.B. Verschlammung der Arbeitsfläche bei Radladern) sowie die Arbeitsvorbereitung der Arbeitsabläufe.

Das Produkt der Faktoren $\eta_1 \times \eta_2$ wird auch als **Betriebsbeiwert** bezeichnet.

Leistung im Baubetrieb



Neben den Leistungseinflussfaktoren, die durch den Menschen, die Organisation und die Umweltbedingungen beeinflusst werden, müssen noch die **technischen Leistungseinflussfaktoren** erfasst werden. Diese geben den Einfluss der realen Betriebsbedingungen gegenüber den als ideal definierten Bedingungen zur Ermittlung der Grundleistung Q_0 wieder. Die idealen Bedingungen, die der Ermittlung der Grundleistung zugrunde liegen, müssen den Unterlagen der Maschinenhersteller wie z.B. [6], [7] entnommen werden.

Die **technischen Leistungseinflussfaktoren** untergliedern sich in (nach [5] und [8]):

- f_1 Abbau- bzw. Grabtiefenfaktor: Geometrische Relationen wie Abbauhöhe/Grabtiefe zu Löffelstielänge.
- f_2 Schwenkwinkleinfluss- bzw. Fahrwegfaktor: Verhältnis des idealen zum realen Schwenkwinkel bzw. Fahrweg vom Lade- zum Abładepunkt.
- f_3 Entleerungsgenauigkeitsfaktor: Entladen des Löffels oder der Schaufel gezielt auf ein Transportfahrzeug oder nur auf Schütthäufen oder eine Kippe. Bei Entleerung auf ein Transportgerät ist das Verhältnis von Löffel-/Schaufelinhalt zum Fassungsvermögen des Transportgeräts zu berücksichtigen.
- f_4 Schneiden- bzw. Zahnzustandsfaktor: Abnutzungsgrad der Schneid- bzw. Aufladewerkzeuge.
- f_5 Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor: Einsatzzeit, Instandhaltungszustand des Geräts.

Der **Geräteausnutzungsgrad** η_G [-] ergibt sich aus dem Quotienten der effektiven Betriebszeit (= Schichtzeit minus Unterbrechungs-/Ausfallzeiten) und der Schichtzeit. Man kann diesen Faktor auch als Effektivitätsfaktor bezeichnen; er sagt aus, dass ein Gerät z.B. 50 min/h effektiv arbeitet. Diese Reduktion ergibt sich aus Umsetzzeiten bei einem Bagger während eines kontinuierlichen Aushubvorgangs (z.B. Graben) bzw. Ladevorgangs, um die optimale Geräteposition im Gerätearbeitsbereich für die Arbeit einzunehmen, oder Zigarettenpausen des Maschinenführers etc.

Leistung im Baubetrieb

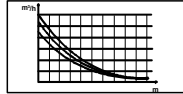


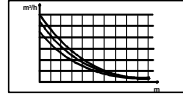
Tabelle der Leistungseinflussfaktoren, durch die die in den Handbüchern [6], [7] beschriebenen Idealbedingungen abgemindert werden:

Tabelle 1-2: Leistungseinflussfaktoren

η_1	≤ 1 :	Mensch: Leistungsfaktor des Geräteführers (Ausbildung, Motivation)
η_2	≤ 1 :	Organisation und Umwelt: Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Leistung (Wetter, Staub, Helligkeit, Arbeitsvorbereitung, Arbeitsabläufe etc.)
$f_1 \dots f_5$	≤ 1 :	Technik: Technische Einflussfaktoren
η_G	≤ 1 :	Effektivzeit: Geräteausnutzungsgrad eines Geräts, z.B. bezogen auf die Schichtzeit (Schichtzeit = effektive Betriebszeit sowie Unterbrechungs- und Ausfallzeiten)

Die Faktoren für die wichtigsten Leistungsgeräte können Kapitel 8 entnommen bzw. in Analogie übertragen werden.

Leistung im Baubetrieb



1.2 Bestimmung von Leistungswerten

Nachkalkulation

Leistungswerte beruhen auf Erfahrung und werden normalerweise im Rahmen des technischen Controllings dokumentiert. Sie resultieren aus der Nachkalkulation bereits fertig gestellter Bauprojekte und dienen vor allem der Ermittlung der für die Ausführung geräteintensiver Arbeiten benötigten Maschinen- und Lohnstunden. Ihre Kehrwerte ergeben Aufwandswerte, die sich als Quotient aus verbrauchter Arbeitszeit und geleisteter Menge definieren.

Die für die Ausführung einer Tätigkeit benötigten Arbeitsstunden werden mit Hilfe dieser Aufwandswerte für Bauwerke mit gleichen Randbedingungen herangezogen. In der Kalkulation bezeichnet man die Aufwandswerte auch häufig als Stundenansätze.

$$\text{Ist-Leistung} = \frac{\text{geleistete Menge}}{\text{verbrauchte Arbeitszeit}}$$

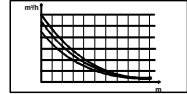
$$\text{Ist-Aufwandswert} = \frac{\text{verbrauchte Arbeitszeit}}{\text{geleistete Menge}} = \frac{1}{\text{Ist-Leistung}}$$

Durchschnittliche Leistungswerte für Bauleistungen sind in Standardbüchern [9], [10], [11], [12] zusammengestellt, werden aber von den Bauunternehmen meist anhand eigener Erfahrungen aufgestellt und auf dem neuesten Stand gehalten.

Folgende Punkte sind bei der Ermittlung der Leistungswerte zu berücksichtigen:

- Jede Arbeit hat zu Beginn ihrer Ausführung eine Anlaufzeit, auch Lernphase genannt, bei der aufgrund der notwendigen Einarbeitung (Lernkurve) nur eine verminderte Leistung erzielt wird. Zusätzlich schränken in der Auslaufzeit der Ausführung verminderte Arbeitsflächen und Störungen im Bauablauf durch nachfolgende Gewerke die Leistungsfähigkeit ein. Zwischen Anlauf- und Auslaufzeit liegt die Hauptleistungszeit, in der die höchste Leistung erbracht wird. Diese Hauptleistungszeit setzt sich zusammen aus der Betriebszeit, den betrieblich bedingten Wartezeiten und den Umsetzzeiten auf der Baustelle. Für die Arbeitsausführung sind nun zwei Leistungswerte ermittelbar:

Leistung im Baubetrieb



- Ein mittlerer Leistungswert, bezogen auf die Einsatzzeit, bestehend aus Zeiten für Vorbereitung/Einarbeitung, Betriebszeit, betrieblich bedingte Wartezeiten, Umsetzen innerhalb der Baustelle und Zeiten für den Abschluss der Arbeiten.
- Ein höherer Leistungswert, ausschliesslich auf die Betriebszeit bezogen.
- Auch während der Betriebszeit verläuft die Leistungskurve nicht gleichmässig, sondern bewegt sich vielmehr in einer mehr oder weniger grossen Bandbreite um den Durchschnittswert.

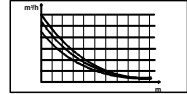
Bei der Ermittlung der Bauzeit und der Baukalkulation ist immer der mittlere auf die Einsatzzeit bezogene Leistungswert zugrunde zu legen. Die Abstimmung und Optimierung der Gerätekonfiguration erfolgt hingegen über den auf die Betriebszeit bezogenen Leistungswert.

Zeitmessverfahren

Das Zeitmessverfahren wird einerseits zur Bestimmung von detaillierten Arbeitsabläufen und Leistungswerten sowie andererseits zur kontinuierlichen Verbesserung sich wiederholender Arbeitsabläufe eingesetzt. Diese detaillierten Leistungswerte werden durch **direkte Messungen und Beobachtungen** während der Bauausführung ermittelt. Zwei Methoden bieten sich hierzu an [3]:

- Die Dauer einzelner Arbeitsvorgänge wie auch der Verlustzeiten misst man mit durchlaufender **Stoppuhr**.
- Mit Hilfe der Momentaufnahme (Zählverfahren, Multimomentverfahren) wird z.B. im Minutenabstand festgestellt und notiert, welche Tätigkeit ein einzelner Arbeiter oder die Arbeitsgruppe zu diesem Zeitpunkt gerade ausführt. Die Summe der Vielzahl solcher Beobachtungsstichproben ergibt eine Häufigkeitsstückliste. Diese enthält, bezogen auf die Gesamtbeobachtungsdauer, bestimmte Zeitanteile je Ablaufart [13].

Diese Methoden liefern bei einer genügend langen Beobachtung sowohl die **Leistungswerte** als auch eine gute **Übersicht** über schlecht funktionierende Arbeitseinsätze und **ungenügende Abstimmung** einzelner Produktionsketten (Verlustzeiten). Daher wird dieses Verfahren hauptsächlich zur kontinuierlichen Verbesserung von sich wiederholenden Arbeitsabläufen auf der Baustelle eingesetzt.



1.3 Leistung von Produktionsketten

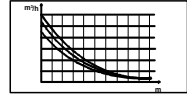
Häufig wird bei der Bauwerkserstellung die Produktionsleistung nicht von einer einzelnen Maschine, sondern von mehreren in einer Produktionskette zusammenarbeitenden Maschinen erbracht. Beispiele hierfür sind das Zusammenspiel

- im **Betonbau** von **Betonmischer, Betontransport, Betonpumpen und Betonverteiler**;
- im **Erdbau** von **Ladegeräten, Lastkraftwagen und Planiergeräten**.

Die Leistung einer Produktionskette wird immer vom **Leitgerät** bestimmt. Beim Leitgerät handelt es sich um eine einzelne Maschine oder eine Maschinengruppe, die innerhalb der Produktionskette die **kleinste Leistung** erbringt. In der Regel sind das Maschinen oder Maschinengruppen, bei denen die Leistung nur sehr aufwendig, z.B. wegen sehr hoher Investitions-, Miet- und Reparaturkosten, oder überhaupt nicht, z.B. wegen räumlichen oder von Arbeitsverfahren bestimmten Begrenzungen, angepasst werden kann. Alle anderen Maschinen der Produktionskette sind dann an die Leistungsfähigkeit des Leitgeräts anzupassen [1].

Erfordert die Durchführung einer Bauaufgabe **zwei parallel oder abwechselnd arbeitende Produktionsketten**, so müssen diese mit dem Ziel eines möglichst kontinuierlichen Produktionsflusses in Bezug **auf minimale Wartezeiten optimiert** werden [3]. Auf Linienbaustellen stellt z.B. das Schalen und Betonieren eines Hochhauses mit den Bauwerksteilen Decken sowie Kern und Stützen ein Beispiel zweier parallel laufender Produktionsketten dar. Die nachfolgenden baubetrieblichen Leistungsberechnungen und vor allem die leistungsabmindernden Beiwerte beruhen auf den Untersuchungen der Firmen Liebherr [6] und Caterpillar [7] sowie der Professoren Bauer [8] und Kühn [14].

Leistung im Baubetrieb



1.4 Allgemeine Leistungsberechnung von Baugeräten

Kurzzeitleistungen

Unter dieser Leistungskategorie werden die Leistungen in der Hauptphase des Vorgangs auf die Betriebszeit bezogen definiert.

Die **theoretische Leistung** Q_T [m^3/h] ist abhängig von der konstruktiven Gestaltung des Geräts in Bezug auf Maschinenleistung, Technologie, Kinematik, Arbeitsgeschwindigkeit und Lade- und Transportgefässinhalt. Sie besteht unter optimalen technischen Betriebsbedingungen, aber ohne Berücksichtigung materialabhängiger, technischer, bedienungs- und betriebsbedingter Einflüsse sowie der Geräteausnutzung.

$$Q_T = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

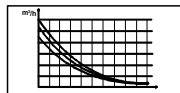
Die **Grundleistung** Q_0 [fm^3/h] berücksichtigt die **materialabhängigen** Einflussfaktoren und erfolgt unter optimalen technischen Betriebsbedingungen, aber ohne Berücksichtigung technischer, bedienungs- und betriebsbedingter Einflüsse sowie der Geräteausnutzung.

$$Q_0 = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \times k_1 \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Die **technische Grundleistung** Q_{T0} [fm^3/h] berücksichtigt alle materialabhängigen und **technischen** Einflussfaktoren, ohne bedienungs- und betriebsbedingte Einflüsse sowie die Geräteausnutzung.

$$Q_{T0} = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Leistung im Baubetrieb



Die **Nutzleistung** Q_N [fm^3/h] (Durchschnittsleistung/Dauerleistung über die Betriebszeit) berücksichtigt alle bekannten materialbedingten und technischen Leistungsfaktoren, insbesondere auch die **Bedienungs- und Betriebsbedingungen sowie die Geräteausnutzung**.

$$Q_N = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

$$k_1 = \alpha \times \varphi \quad [-]$$

$$k_2 = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \quad [-]$$

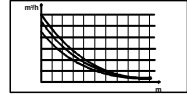
$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2 \quad [-]$$

V_{SAE}	Nenninhalt Grab-/Transportgefäss gemäss SAE	$[\text{m}^3]$
t_s	Spieldzeit	$[\text{s}]$
α	Lösefaktor	$[\text{fm}^3/\text{lm}^3]$
φ	Füllfaktor	$[-]$
η_1	Bedienungsfaktor	$[-]$
η_2	Betriebsbedingungen	$[-]$
f_1	Abbau-/Grabtiefenfaktor	$[-]$
f_2	Schwenkwinkel-/Fahrwegfaktor	$[-]$
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor	$[-]$
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	$[-]$
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	$[-]$
k_1	Ladefaktor	$[-]$
k_2	Leistungseinflussfaktor	$[-]$
k_3	Betriebsbeiwert	$[-]$
η_G	Geräteausnutzungsgrad	$[-]$
fm^3	Material in ungestörtem bzw. verdichtetem Zustand	
lm^3	Material in aufgelockertem Zustand, z.B. auf einer LKW- Mulde	

Die Kurzzeitleistung bezieht sich auf die Betriebszeit, d.h. auf die reine Arbeitszeit des Geräts. Bei grossen, maschinenintensiven Erdbaustellen, d.h. Baustellen mit kontinuierlichem Geräteeinsatz, entspricht sie weitgehend der durchschnittlichen Leistung des gesamten Arbeitstags Q_{AT} [fm^3/h]. Bei zyklischen Arbeitsabläufen, bei denen das Gerät nur zeitweise während der Arbeitszeit in Betrieb ist, weicht die Kurzzeitleistung teilweise deutlich von der Durchschnittsleistung des Arbeitstags ab.

Im Berechnungskonzept von Kurzzeit-/Nutzleistung Q_N sind neben den auf die Grundleistungen Q_0 bezogenen technischen Reduktionsfaktoren

Leistung im Baubetrieb



bereits auch die Bedienungs- und Betriebsbedingungen wie Motivation, Wettereinfluss etc. sowie die Geräteausnutzung während der Betriebszeit enthalten. Berücksichtigt wird ferner, dass eine neue Maschine höhere Leistungen erbringt als eine ältere, bedingt durch Verschleiss, aber auch durch häufigere kleinere Reparaturen an z.B. Hydraulikschläuchen oder Reisszähnen. Ferner ist auch die Geräteausnutzung über einen definierten Zeitraum enthalten, da z.B. ein Baggerführer nicht ununterbrochen eine volle Stunde oder einen ganzen Tag hocheffizient unter Beibehaltung der Konzentration über die ganze Schichtzeit hinweg arbeitet. Bei diesem Geräteausnutzungsgrad ist auch z.B. das Nachrücken eines Baggers während des Aushubs oder Ladevorgangs enthalten.

In der Kurzzeit-/Nutzleistung sind die folgenden Reduktionen nicht enthalten:

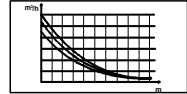
- Vorbereitungszeiten (z.B. Auslegen von Baggermatratzen oder das Umrüsten auf ein anderes Grabgefäß)
- Unterbreuchszeiten für das Umsetzen an einen neuen Standort auf der gleichen Baustelle
- Betrieblich bedingte Unterbrechungen und Wartezeiten
- Einarbeitungs- und Abschlusszeit mit meist geringerer Leistung (Bild 1-3), da einerseits in der Lernphase erst der optimale Ablauf in der Prozesskette gefunden werden muss und andererseits in der Abschlussphase oft schon parallele Arbeiten anderer Gewerke beginnen, die Behinderungen verursachen können, oder noch Nacharbeiten durchgeführt werden müssen.

Langzeitleistung

Die Langzeitleistung, auch Einsatzleistung Q_{ET} genannt, bezieht sich auf die Einsatzzeit der Geräte, die sich aus der Dauer der Prozesse ergibt, und baut auf dem Konzept der Kurzzeitleistung auf. Die Kurzzeitleistung wird dazu ergänzt durch Vorbereitungs- und Einarbeitungszeiten, durch unproduktive betrieblich bedingte Wartezeiten, die Dauer des Umsetzens an einen anderen Arbeitsort auf der Baustelle sowie Zeiten für den Abschluss der Arbeiten.

Beim Sprengvortrieb im Untertagebau, einem zyklisch ablaufenden Vortriebsverfahren, wird nach dem Sprengen das Haufwerk geladen. Diese Arbeiten beanspruchen nur 3 – 4 Stunden einer Schicht von 8 – 10 Stunden. In der restlichen Zeit werden andere Arbeiten durchgeführt. Das bedeutet, dass die effektive Nutzleistung Q_N [fm^3/h] des Geräts we-

Leistung im Baubetrieb



sentlich von der Durchschnittsleistung Q_{AT} [fm^3/h] pro Arbeitstag abweichen kann. Das Gleiche gilt auch bei Baugruben, wenn z.B. in einer gewissen Tiefe der Aushub unterbrochen werden muss, um Anker- oder Aussteifungsarbeiten durchzuführen.

Leistung bei zyklischen Arbeiten

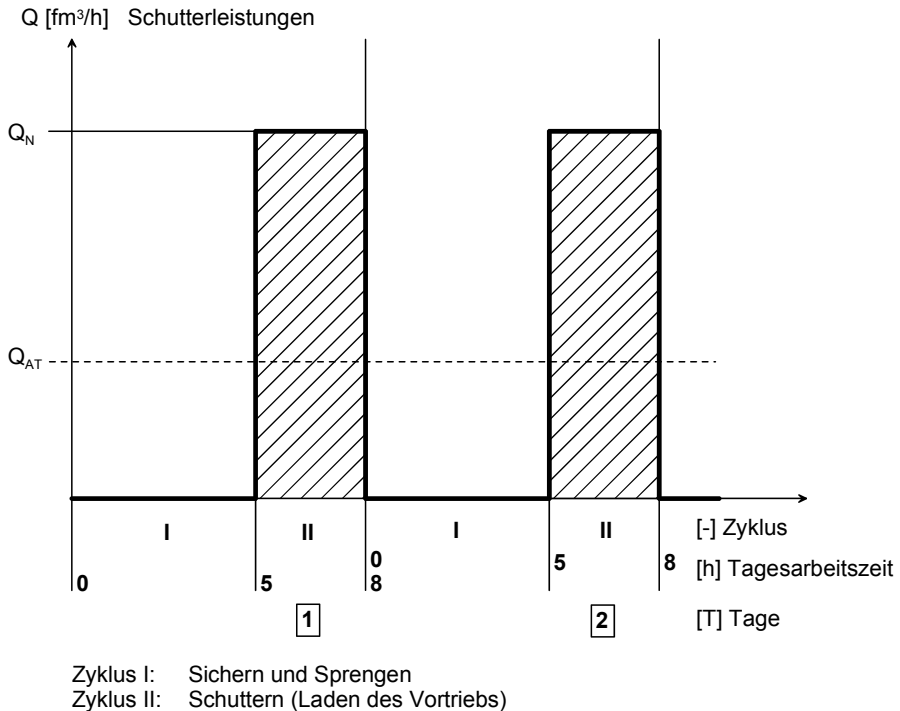
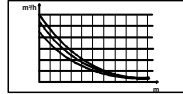


Bild 1-2: Darstellung der Schutterleistung in Abschlagszyklen

Daher müssen die Leistungen einerseits nach Arbeitsabläufen und andererseits nach verschiedenen Zeitabschnitten wie folgt differenziert werden:

- Die Wahl der Maschinen erfolgt aufgrund der erforderlichen Nutzleistung Q_N bzw. Grundleistung Q_0 .
- Die Tagesleistung Q_{AT} ist eine Durchschnittsleistung, die meist dann deutlich von Q_N abweicht, wenn zyklische Arbeiten durchgeführt wer-

Leistung im Baubetrieb



den, oder bei Geräteumsetzungen zu anderen Arbeitsstätten mit zyklischem Charakter.

- Die Einsatzleistung Q_{ET} über die gesamte Einsatzzeit ist meist für kalkulatorische Zwecke erforderlich und beinhaltet neben der Nutzleistung Q_N bzw. Tagesleistung Q_{AT} die Reduktion durch die Vorbereitungszeit, Einarbeitungs- und Abschlussphase sowie betrieblich bedingte Unterbrechungen.

Allgemeiner Leistungsverlauf während der Vorhaltezeit

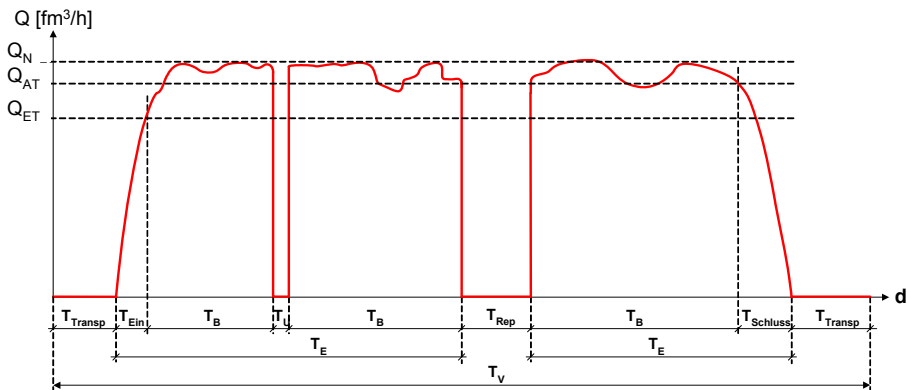
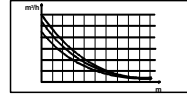


Bild 1-3: Leistungsverlauf

Q_N	Nutz-/Dauerleistung des Geräts $\triangleq$ Leistung bezogen auf die Betriebszeit	$[fm^3/h]$
Q_{AT}	Tagesdurchschnittsleistung des Geräts $\triangleq$ Leistung bezogen auf die Tagesarbeitszeit	$[fm^3/h]$
Q_{ET}	mittlere Einsatzleistung des Geräts $\triangleq$ Leistung bezogen auf die Einsatzzeit	$[fm^3/h]$
T_{Transp}	Zeit für den Transport	$[h]; [AT]$
T_{Ein}	Einarbeitungszeit	$[h]; [AT]$
T_B	Betriebszeit des Geräts pro Arbeitstag	$[h]; [AT]$
T_U	Zeit für betrieblich bedingte Unterbrechungen	$[h]; [AT]$
T_{Rep}	Zeit für Reparaturen	$[h]; [AT]$
$T_{Schluss}$	Dauer der Schlussphase	$[h]; [AT]$
T_E	Einsatzzeit der Geräte	$[h]; [AT]$
T_V	Vorhaltezeit	$[h]; [AT]$
d	Vorgangsdauer – mögliche Betriebs- bzw. Arbeitstage gemäss Terminplan (Einsatzzeit)	$[h]; [AT]$

Leistung im Baubetrieb



Die **effektive Leistung**, bezogen auf die **Arbeitszeit** Q_{AT} [fm^3/h] bzw. die **Einsatzzeit** Q_{ET} [fm^3/h], ergibt sich zu:

$$\text{Arbeitszeit:} \quad Q_{AT} = Q_N \times \frac{T_B}{T_{AT}} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

$$\text{Einsatzzeit:} \quad Q_{ET} = Q_{AT} \times \frac{T_{AT}}{T_{ET}} = Q_N \times \frac{T_B}{T_{ET}} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Q_{AT}	Tagesdurchschnittsleistung des Geräts	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
Q_{ET}	mittlere Einsatzleistung des Geräts	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
Q_N	Nutz-/Dauerleistung des Geräts	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
T_B	Betriebszeit des Geräts pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$
T_{AT}	Arbeitsstunden pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$
T_{ET}	Einsatzstunden pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$

Die **erforderliche durchschnittliche Leistung**, bezogen auf die **Einsatzzeit** $Q_{ET\text{-erf.}}$ [fm^3/h], ergibt sich zu:

$$Q_{ET\text{-erf.}} = \frac{V}{T_{AT} \times d} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

V	Gesamtaushub (Arbeit)	$[\text{fm}^3]$
T_{AT}	Arbeitsstunden pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$
d	Vorgangsdauer – mögliche Betriebs- bzw. Arbeitstage gemäss Terminplan (Einsatzzeit)	$[\text{AT}]$

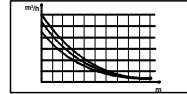
Anzahl der Lösegeräte n [-]

$$n \geq \frac{Q_{ET\text{-erf.}}}{Q_{ET}} \quad [-]$$

$$Q_{ET} = Q_N \times \frac{T_B}{T_{ET}} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Q_{ET}	mittlere Einsatzleistung eines Geräts	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
T_B	Betriebszeit des Geräts pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$
T_{ET}	Einsatzstunden pro Arbeitstag	$[\text{h}/\text{AT}]$

Leistung im Baubetrieb



Die **Leistung Q_{AT} in der Arbeitszeit T_{AT} entspricht weitgehend der Nutz-/Dauerleistung Q_N** , wenn keine zusätzlichen Zeitaufwendungen notwendig werden, die über die in den Gerätezustandsfaktoren, z.B. für tägliche Routinewartung, sowie im Geräteausnutzungsfaktor für kleinere Umsetzungsarbeiten und Erholungspausen schon enthaltenen Zeitaufwendungen hinausgehen.

Die **Arbeitszeit T_{AT} [h/AT]** ergibt sich aus:

$$T_{AT} = \sum_i T_i = T_B + \sum_j T_j \quad [h/AT]$$

Die Arbeitszeit pro Tag T_{AT} setzt sich zusammen aus:

- der Betriebszeit des Geräts T_B
- den möglichen gewollten und ungewollten Unterbrechungen $\sum_j T_j$,
z.B. durch Umsetzen der Maschinen, Unterbruch in der Versorgung, kleine Wartungsarbeiten, zyklische Arbeiten

Die Arbeitszeit T_{AT} entspricht normalerweise der Regelarbeitszeit auf der Baustelle.

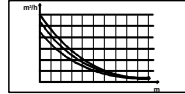
Man kann davon ausgehen, dass die Nutzleistung über Stunden und Tage bei gleicher Arbeit aufrechterhalten werden kann. Muss jedoch das Gerät umgesetzt oder müssen z.B. in einer Baugrube zuerst die Anker gesetzt werden, bevor mit dem Aushub fortgefahren werden kann, dann entspricht die Nettoarbeitszeit des Geräts oder der Prozesskette nicht der Arbeitszeit, der Einsatzzeit und vor allem nicht der Vorhaltezeit.

Unter der **Einsatzzeit T_{ET}** werden alle Zeiten zusammengefasst, an denen das Gerät in Betrieb ist. Dazu gehören:

- Vorbereitungszeiten
- Einarbeitungszeit
- Betriebszeit
- Umsetzen auf der Baustelle
- Baubetrieblich bedingte Wartezeit
- Schlussphase

In dieser Zeit ist das Gerät ohne Unterbrechung durch Wartungen, Reparaturen oder Stillstandstage in Betrieb.

Leistung im Baubetrieb



Damit ergibt sich die **Einsatzzeit** T_{ET} zu:

$$T_{ET} = T_{Vor} + T_{Ein} + T_B + T_U + T_{Um} + T_{Schluss} \quad [h]; [AT]$$

T_{Vor}	Vorbereitungszeiten	[h]; [AT]
T_{Ein}	Einarbeitungszeit	[h]; [AT]
T_B	Betriebszeit	[h]; [AT]
T_U	Zeit für betrieblich bedingte Unterbrechungen	[h]; [AT]
T_{Um}	Umsetzzeiten auf der Baustelle	[h]; [AT]
$T_{Schluss}$	Dauer der Schlussphase	[h]; [AT]

Die **Vorhaltezeit** T_{VT} umfasst die Einsatzzeit und das Einrichten sowie die Auf-, Um- und Abbau der Geräte mit den dazugehörigen Transportzeiten, die Stillliegezeit auf der Baustelle und die Zeiten für Wartung/Pflege und Reparatur. Damit ergibt sich die **Vorhaltezeit** T_{VT} zu:

$$T_{VT} = T_{ET} + T_{Transp} + T_{Aufbau} + T_{Rep} + T_{Wartung} + T_{Still} + T_{Umbau} + T_{Abbau} \quad [h]; [AT]$$

T_{Transp}	Zeiten für An- und Abtransport	[h]; [AT]
T_{Aufbau}	Zeiten für den Aufbau	[h]; [AT]
T_{Rep}	Reparaturzeiten	[h]; [AT]
$T_{Wartung}$	Wartungs- und Pflegezeiten	[h]; [AT]
T_{Still}	Stillliegezeiten	[h]; [AT]
T_{Umbau}	Umbauzeiten	[h]; [AT]
T_{Abbau}	Abbauzeiten	[h]; [AT]

Es ist daher **sehr wichtig**, dass bei **Leistungsangaben** der **Bezugszeitrahmen** genau **angegeben** wird.

2 Baustelleneinrichtungen

Sozialeinrichtungen

Wasserversorgung

Stromversorgung

Druckluftversorgung

Separationsanlagen

Sozialeinrichtungen



2.1 Sozialeinrichtungen [15], [16]

Die hier angegebenen Werte dienen nur zur Vordimensionierung der Sozialeinrichtungen. In jedem Land müssen die speziellen Vorschriften der Arbeitsstättenverordnung beachtet werden.

Tabelle 2-1: Richtwerte der Sozialeinrichtungen

Nr.	Sozialräume	m ² / Arbeiter	m ³ / Arbeiter	Andere
1	Tagesunterkünfte	1		
2	Schlaf-/Wohnunterkunft	> 6	> 10	
3	Kantine (mit Küche und Magazin)	2.5		
4	WC			1/Baustelle bzw. 1/(15 Arbeiter)
5	Waschraum			1 Waschraumplatz/ Baustelle bzw. 1 Waschraumplatz/ (5 Arbeiter)
6	Duschen bei mehr als 10 Arbeitern und Baustellen- dauer > 2 Wochen			1 Dusche/ (20 Arbeiter)
7	Mindestraumhöhen			2.3 m
8	Fensterfläche			1/10 der Grund- fläche

Zudem sind spezifische Anforderungen hinsichtlich Tischen, Stühlen, Schränken und anderer Einrichtungsgegenstände zu beachten.



2.2 Wasserversorgung [17]

Begriffsbestimmung und Berechnungsvorgang

- **Wasserbedarfsermittlung:**

Die Wasserbedarfsermittlung ist notwendig zur Dimensionierung der Versorgungsquelle, der Versorgungsleitungen und eventueller Zusatzeinrichtungen wie Pumpanlagen.

Ermittlung anhand von Richtwerten (Tabelle 2-2):

a) Arbeitnehmer

Trink- und Brauchwasserbedarf der Arbeitnehmer (AN) am Arbeitstag (AT)
[l/AN und AT]

Anzahl AN $\times$ Richtwert [$\text{m}^3/\text{AN und AT}$] = [m^3/AT]

b) Aufbereitungsanlagen

Beton- und Mörtelanmachwasserbedarf
[m^3/m^3]

Leistung Anlage [m^3/AT] $\times$ Richtwert [m^3/m^3] = [m^3/AT]

c) Sonstige Anlagen

Sonstiger Brauchwasserbedarf für Wasch-, Sieb- oder Trennanlagen für Zuschlagstoffe [m^3/m^3]

Leistung Anlage [m^3/AT] $\times$ Richtwert [m^3/m^3] = [m^3/AT]

Zwischensumme 1 = [m^3/AT]

Wasserversorgung



- d) Zuschlag für Betonnachbehandlung usw.

Pauschaler Zuschlag auf den ermittelten Wasserbedarf für weiteres Brauchwasser zur Nachbehandlung von Beton, zum Feuchthalten der Schalung, zur Reinigung von Geräten und Fahrzeugen [%]

$$\text{Zuschlag} \times \text{Zwischensumme 1 [m}^3/\text{AT]} = \dots\dots\dots [\text{m}^3/\text{AT}]$$

$$\textbf{Zwischensumme 2} = \dots\dots\dots [\text{m}^3/\text{AT}]$$

- e) Zuschlag für Verluste in prov. Leitungen

Pauschaler Zuschlag auf den ermittelten Wasserbedarf für Verluste in provisorischen Leitungen [%]

$$\text{Zuschlag} \times \text{Zwischensumme 2 [m}^3/\text{AT]} = \dots\dots\dots [\text{m}^3/\text{AT}]$$

$$\textbf{Gesamtwasserbedarf } Q_{\emptyset} = \dots\dots\dots [\text{m}^3/\text{AT}]$$

• Dimensionierung der Rohrleitung

Maximaler Wasserbedarf Q [l/s]

Wassermenge für allgemeinen Gebrauch $Q_{\max}^1$ [l/s]

Der maximale Wasserbedarf ($Q_{\max}^1$) ergibt sich aus dem 1.5fachen des durchschnittlichen täglichen Gesamtbedarfs (s.o.).

$$Q_{\max}^1 = \frac{Q_{\emptyset}}{T_{\text{AT}}} \times \frac{1.5}{3.6} \quad [\text{l/s}]$$

$Q_{\max}^1$	maximaler Wasserbedarf der Baustelle	[l/s]
$Q_{\emptyset}$	durchschnittl. tägl. Gesamtwasserbedarf	[m ³ /AT]
T_{AT}	tägliche Arbeitszeit	[h/AT]

Wasserversorgung



Wassermenge für Betonmischer $Q_{\max}^2$ [l/s]

Für die Dimensionierung der Leitung zum Betonmischer muss gewährleistet sein, dass eine Wassermenge von einem Fünftel des Nenninhalts des Mixers innerhalb von z.B. 20 Sekunden gleichmässig zugegeben werden kann. [17]

$$Q_{\max}^2 = \frac{\frac{1}{5} \times V_{\text{misch}}}{\Delta t} \quad [\text{l/s}]$$

$Q_{\max}^2$ maximaler Wasserbedarf zur Betonherstellung [l/s]

V_{misch} Nenninhalt des Mixers [l]

Δt 20 Sekunden Zulauf für Betonmischer [s]

Bei grossem Wasserbedarf für den Mischer empfiehlt sich die Anordnung eines Zwischenspeichers.

Maximaler Wasserbedarf Q [l/s]

$$Q = \max\{Q_{\max}^1; Q_{\max}^2\} \quad [\text{l/s}]$$

f) Durchmesser der Rohrleitung d [dm]

Der **Durchmesser der Rohrleitung d [dm]** ergibt sich aus dem **maximalen Wasserbedarf Q [l/s]**:

$$Q = \frac{d^2 \times \pi}{4} \times v \quad 1 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \quad [\text{l/s}]$$

$$\Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \times Q}{v \times \pi}} \quad [\text{dm}]$$

Q Fördermenge bzw. max. Wasserbedarf [l/s]

d lichter Durchmesser der Rohrleitung [dm]

v Wassergeschwindigkeit in der Rohrleitung, meist 5 bis 8 dm/s [dm/s]

Wasserversorgung



Richtwerte für den Wasserbedarf

Tabelle 2-2: Wasserbedarf [17]

Trinkwasser und Waschen	20 – 30	l/(AN und AT)
Duschen	40	l/(AN und AT)
Trinkwasser, Waschen und Duschen	40 – 70	l/(AN und AT)
Trink- und Brauchwasserbedarf bei Tagesunterkünften	20 – 30	l/(AN und AT)
Trink- und Brauchwasserbedarf bei Wohn- und Schlafunterkünften	50 – 100	l/(AN und AT)
Betonanmachwasser	0.1 – 0.2	m ³ /m ³ _{Beton}
Mörtelanmachwasser	0.2 – 0.25	m ³ /m ³ _{Mörtel}
Brauchwasser für Kiesaufbereitung	1.0 – 3.0	m ³ /m ³ _{Kies}
Zuschlag für weiteres Brauchwasser	20 – 25	%
Wasserverluste bei provisorischen Leitungen	10 – 20	%

Wasserversorgung



Beispiel zur Ermittlung des Gesamtwasserbedarfs einer Bürogebäude-Baustelle

• Ausgangsdaten

Rohbau:

max. Anzahl Arbeitnehmer (AN) Betonarbeit	=	15	AN
davon in Wohnunterkünften	=	5	AN
in Tagesunterkünften	=	10	AN
max. Betonierleistung	=	180	$\text{m}^3_{\text{Beton}}/\text{AT}$
Betonanmachwasser	=	0.15	$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{Beton}}$
Zuschlag weiteres Brauchwasser	=	25	%
Zuschlag für Verluste	=	15	%

Ausbau:

Anzahl Arbeitnehmer in Tagesunterkünften	=	50	AN
--	---	----	----

• Wasserbedarf der AN

10 AN $\times 0.03 \text{ m}^3/(\text{AT und AN})$	=	0.3	m^3/AT
5 AN $\times 0.10 \text{ m}^3/(\text{AT und AN})$	=	0.5	m^3/AT

Der maximale Bedarf ergibt sich meist, wenn im letzten Geschoss noch die Rohbauarbeiten laufen und in den Untergeschossen schon der Ausbau beginnt.

50 AN $\times 0.03 \text{ m}^3/\text{AT und AN}$	=	1.5	m^3/AT
--	---	-----	------------------------

• Wasserbedarf Betonherstellung

$180 \text{ m}^3_{\text{Beton}}/\text{AT} \times 0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3_{\text{Beton}}$	=	27.00	m^3/AT
--	---	-------	------------------------

Zwischensumme 1	=	29.30	m^3/AT
------------------------	---	-------	------------------------

• Sonstiges

Nachbehandeln des Betons und Gerätereinigung	25 % von 29.30	=	7.33	m^3/AT
---	----------------	---	------	------------------------

Zwischensumme 2	=	36.63	m^3/AT
------------------------	---	-------	------------------------

Leitungsverluste	15 % von 36.63	=	5.49	m^3/AT
------------------	----------------	---	------	------------------------

• Gesamtwasserbedarf

=	42.12	m^3/AT
---	--------------	------------------------

Wasserversorgung



Beispiel zur Dimensionierung der Rohrleitung

- **Ausgangsdaten**

Wasserbedarf	=	42.12 m ³ /AT
Fliessgeschwindigkeit	=	0.8 m/s = 8 dm/s
Anzahl Arbeitsstunden pro Arbeitstag	=	9 h/AT
Faktor für stündlichen Spitzenbedarf	=	1.5
Zwangsmischergrösse	=	1250 l
Wasserzugabezeit in den Mischer	=	20 s

- **Max. Wasserbedarf pro Stunde**

aus Gesamtwasserbedarf

$$Q_{\max}^1 = \frac{42.12}{9} \times \frac{1.5}{3.6} = 1.95 \text{ l/s}$$

aus Betonmischergrösse

$$Q_{\max}^2 = \frac{0.2 \times 1250}{20} = 12.5 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}^1 \ll Q_{\max}^2$$

⇒ Es empfiehlt sich die Anordnung eines Zwischenspeichers, da ansonsten die Leitungsdimensionierung zu einem unwirtschaftlichen Durchmesser führt. Für die Dimensionierung ist dann $Q_{\max}^1$ massgebend.

- **Durchmesser Gesamtzuleitung bis zum Baustellenverteiler**

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 1.95}{8 \times \pi}} = 0.56 \text{ dm} = 56 \text{ mm}$$

Stromversorgung



2.3 Stromversorgung [17], [18], [19]

Begriffsbestimmung und Berechnungsvorgang

- **Leistungsbedarf**

Der Bedarf der elektrotechnischen Einrichtungselemente der Baustelle zur Bestimmung der elektrischen Energie wird nach Einphasen- und Dreiphasenverbrauchern getrennt zusammengestellt. Die Richtwerte für die Anschlusswerte der Verbraucher können den Handbüchern der Gerätehersteller sowie [4] bzw. den nachfolgenden Seiten entnommen werden.

a) Leistungswerte der Verbraucher

Zusammenstellung der Leistungswerte der einzelnen Verbraucher getrennt nach:

- **Einphasenwechselstrom (230 V)**

Die Angabe der wirksamen Leistung in [kW] von Verbrauchern wie z.B. Beleuchtung, Wasserkocher entspricht dem Anschlusswert.

Stück	Verbraucher	Wirkleistung [kW]	
		einzel	Gesamt
2	Kranleuchten	40	80
..	..	..	..
..	..	..	..

- **Dreiphasenwechselstrom (400 V)**

Angabe der mechanischen wirksamen Leistung an der Antriebswelle von motorgetriebenen Verbrauchern in [kW]; dies kann dem Typenschild oder der BGL [4] entnommen werden. Diese Werte sind nicht dem Anschlusswert gleichzusetzen.

Stück	Verbraucher	Motorleistung [kW]	
		einzel	gesamt
2	Turmdrehkran	40	80
..	..	..	..
..	..	..	..

Stromversorgung



b) Leistungsaufnahme der Verbraucher

Die Leistungsaufnahme der Verbraucher bestimmt sich aus der dem Verbraucher zuzuführenden Leistung P_{zu} in [kW] unter Berücksichtigung der Energieausnutzung (Wirkungsgrad) des Verbrauchers. Die Leistung P_{zu} wird aus dem Wirkungsgrad η ermittelt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad [-]$$

η	Wirkungsgrad	[-]
P_{ab}	vom Verbraucher abgegebene Leistung	[kW]
P_{zu}	dem Verbraucher zugeführte Leistung	[kW]

Für einzelne Motoren entspricht P_{ab} der Motorleistung in [kW], der Wirkungsgrad kann mit 0.6 – 0.9 angenommen werden.

Werden verschiedene Verbraucher zusammengefasst, d.h. ist P_{ab} die Summe aller erfassten Gerätewerte in [kW], so kann der Wirkungsgrad mit 0.8 – 0.85 angenommen werden.

Danach bestimmt sich **die dem Verbraucher zuzuführende Leistung P_{zu} [kW]** zu

$$P_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta} \quad [kW]$$

c) Leistungsbereitstellung des Netzes

Die Leistungsbereitstellung des Netzes bestimmt sich aus der gemessenen Spannung und Stromstärke im Netz unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung von Spannung und Stromstärke in Wechselstromkreisen mit induktivem Widerstand (Motor).

Die sich daraus ergebende Scheinleistung P_S setzt sich zusammen aus einer **Wirkleistung P_W [kW]**

$$P_W = U \times I_W = U \times I \times \cos\varphi \quad [kW]$$

P_W	Wirkleistung	[kW]
U	Spannung	[V]
I	Scheinstrom	[A]
I_W	Wirkstrom	[A]

Stromversorgung



$\cos\varphi$ Leistungsfaktor für den Wirkstrom und einer senkrecht dazu stehenden **Blindleistung P_B [kVA]** [-]

$P_B = U \times I_B = U \times I \times \sin\varphi$	[kVA]
--	-------

P_B	Blindleistung	[kVA]
U	Spannung	[V]
I	Scheinstrom	[A]
I_B	Blindstrom	[A]
$\sin\varphi$	Leistungsfaktor für den Blindstrom	[-]

Das Verhältnis von tatsächlich aus dem Netz entnommener Leistung in [kW] zu im Netz gemessener Leistung in [kVA] ist der **Leistungsfaktor $\cos\varphi$ [-]**.

$\cos\varphi = \frac{P_W}{P_S}$	[-]
---------------------------------	-----

P_S	Scheinleistung	[kVA]
P_W	Wirkleistung	[kW]
$\cos\varphi$	Leistungsfaktor für den Wirkstrom	[-]

Für einzelne Motoren kann der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ mit 0.8 – 0.9 angenommen werden. Bei Zusammenfassung mehrerer Verbraucher liegt der Wert für $\cos\varphi$ bei 0.6 – 0.8. Die Wirkleistung P_W entspricht der berechneten zugeführten Leistung P_{zu} .

Danach ergibt sich für die **Scheinleistung P_S [kVA]**:

$P_S = \frac{P_{zu}}{\cos\varphi}$ mit $P_{zu} = P_W$	[kVA]
---	-------

P_S	Scheinleistung	[kVA]
P_{zu}	zugeführte Leistung (= Wirkleistung P_W)	[kW]
$\cos\varphi$	Leistungsfaktor für den Wirkstrom	[-]

Stromversorgung



Vektoriell stellt sich der Zusammenhang zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung wie folgt dar:

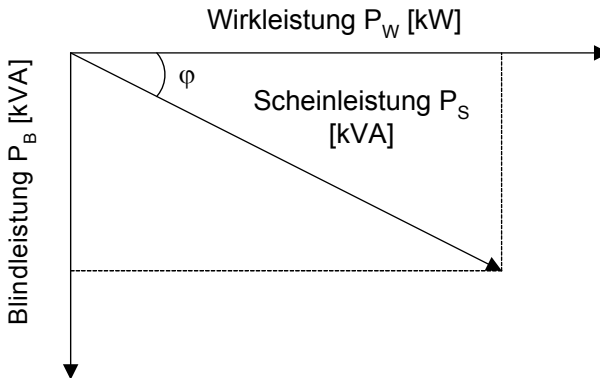


Bild 2-1: Schematische Darstellung der Leistung von Motoren

Die Angaben in kW sind die Verbrauchsleistungen. Die Angaben in kVA sind die bereitgestellten Leistungen (Scheinleistung) der Transformatoren.

Mechanisch durch den Motor nutzbar ist nur der wirksame Anteil der Scheinleistung P_w . Bei Beleuchtungseinrichtungen usw. ist nur die Wirkleistung zu berücksichtigen. Eine Blindleistung tritt nicht auf. Es ergibt sich die **gesamte erforderliche Scheinleistung** P_{Sges} [kVA] aus der geometrischen Addition von Scheinleistung der Motoren und Wirkleistung der Beleuchtung zu:

$$P_{Sges} = \sqrt{(P_S \times \cos\varphi + P_{WB})^2 + (P_S \times \sin\varphi)^2} \quad [\text{kVA}]$$

P_{Sges}	gesamte Scheinleistung	[kVA]
P_S	Scheinleistung	[kVA]
P_{WB}	Wirkleistung der Beleuchtung	[kW]
$\cos\varphi$	Leistungsfaktor für den Wirkstrom	[-]
$\sin\varphi$	Leistungsfaktor für den Blindstrom	[-]

Stromversorgung

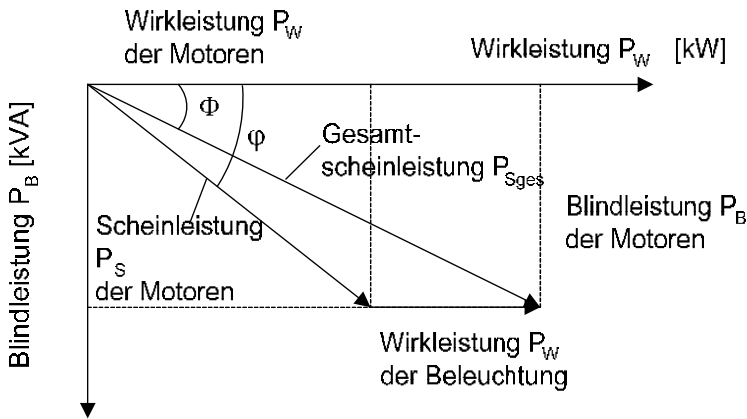


Bild 2-2: Schematische Darstellung der Gesamtleistung

d) Anschlusswert der Baustelle

Der Gesamtanschlusswert P_{AW} in [kVA] für die Baustelle ergibt sich aus der Gesamtscheinleistung P_{Sges} in [kVA] unter Berücksichtigung, dass nicht alle Verbraucher gleichzeitig eingeschaltet sind. Dies wird im Gleichzeitigkeitsfaktor a ausgedrückt, der das Verhältnis von tatsächlichem zu theoretisch möglichem Leistungsbedarf angibt.

Für den Gleichzeitigkeitsfaktor a kann angenommen werden:

- **0.4 – 0.5 für Grossbaustellen**
- **0.6 – 0.75 für sonstige Baustellen**
- **0.75 – 0.85 für Einzelgeräte mit mehreren Motoren**

Danach wird der **Anschlusswert P_{AW} [kVA]**:

$P_{AW} = P_{Sges} \times a$		[kVA]
P_{AW}	Anschlusswert der Baustelle	[kVA]
P_{Sges}	Gesamtscheinleistung	[kVA]
a	Gleichzeitigkeitsfaktor	[-]

Stromversorgung



• Dimensionierung der elektrischen Versorgungsleitungen [17]

a) Nach dem zulässigen Spannungsabfall

Vertretbare Spannungsverluste ΔU in Versorgungsleitungen sind:

- 5 % der Nennspannung bei 400 V d.h. 20 V
- 3 % der Nennspannung bei 230 V d.h. 6,9 V

Nachfolgend sind die Formeln für die Berechnung des erforderlichen Leitungsquerschnitts aufgeführt.

Tabelle 2-3: Formeln zur Berechnung des erforderlichen Leitungsquerschnitts A [mm²]

	Spannungsabfall ΔU [V]	Leitungsquerschnitt A [mm ²]
Einphasen- wechselstrom	Strom I bekannt	
	$\Delta U = \frac{2 \times I_L \times I}{\chi \times A} \times \cos \varphi$	$A = \frac{2 \times I_L \times I}{\chi \times \Delta U} \times \cos \varphi$
	Leistung P_W bekannt	
	$\Delta U = \frac{2 \times I_L \times P_W}{\chi \times A \times U}$	$A = \frac{2 \times I_L \times P_W}{\chi \times \Delta U \times U}$
Dreiphasen- wechselstrom	Strom I bekannt	
	$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \times I_L \times I}{\chi \times A} \times \cos \varphi$	$A = \frac{\sqrt{3} \times I_L \times I}{\chi \times \Delta U} \times \cos \varphi$
	Leistung P_W bekannt	
	$\Delta U = \frac{I_L \times P_W}{\chi \times A \times U}$	$A = \frac{I_L \times P_W}{\chi \times \Delta U \times U}$

U	Spannung	[V]
ΔU	Spannungsabfall	[V]
I	Stromstärke	[A]
P_W	Wirkleistung bzw. Anschlusswert P_{AW}	[W]
I_L	Leitungslänge	[m]
A	Leitungsquerschnitt	[mm ²]
χ	Leitfähigkeit	[m/Ωmm ²]
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor	[-]

Stromversorgung



Die **Stromstärke I [A]** ergibt sich

- **für Einphasenwechselstrom aus:**

$$I = \frac{P_w}{U \times \cos\varphi} \quad [\text{A}]$$

- **für Dreiphasenwechselstrom aus:**

$$I = \frac{P_w}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} \quad [\text{A}]$$

b) Nach der zulässigen thermischen Belastung

Durch die Verlustleistung wird im Kabel Wärme erzeugt, die über die Oberfläche abgeleitet werden muss. Die Temperatur ist vom Isolierstoff abhängig. Sie begrenzt die maximal zulässige Stromstärke. Für kurze Leitungen ist fast immer die thermische Belastbarkeit massgebend.

Wurde der erforderliche Leitungsquerschnitt A_{erf} bestimmt, kann die vorhandene Stromstärke I_{vorh} ermittelt werden. Im Anschluss muss dieser Wert mit der zulässigen thermischen Dauerbelastbarkeit I_{zul} der Leitung überprüft werden. Die zulässige Dauerbelastungen in [A] und die Leitungsschutzsicherungen sind in Tabelle 2-4 aufgeführt.

Stromversorgung



Tabelle 2-4: Zulässige Dauerbelastung und Zuordnung von Überstrom-Schutzorganen für isolierte Leitungen [20]

Nenn- quer- schnitt mm ²	Gruppe 1 Bis zu 3 Leitungen in Rohren				Gruppe 2 Rohrdrähte, Feuchtraumleitungen, Stegleitungen, frei in Luft verlegte mehradrige Leitungen und mehradrige Leitungen zum Anschluss ortsveränderlicher Stromverbraucher (einschliessl. Leitungstrossen)				Gruppe 3 Frei in Luft verlegte einadrige Leitungen, wobei die Leitungen mit Zwischenraum von mindestens Leitungsdurchmesser verlegt sind, und einadrige Leitungen zum Anschluss ortsveränderlicher Stromverbraucher			
	Kupfer		Aluminium		Kupfer		Aluminium		Kupfer		Aluminium	
	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A	Belast- barkeit in A	Höchstzu- lässiger Nenn- strom der Strom- sicherung in A
0.75	—	—	—	—	13	10	—	—	16	15	—	—
1	12	10	—	—	16	15	—	—	20	20	—	—
1.5	16	15	—	—	20	20	—	—	25	25	—	—
2.5	21	20	16	15	27	25	21	20	34	35	27	25
4	27	25	21	20	36	35	29	25	45	50	35	35
6	35	35	27	25	47	50	37	35	57	60	45	50
10	48	50	38	35	65	60	51	50	78	80	61	60
16	65	60	51	50	87	80	68	60	104	100	82	80
25	88	80	69	60	115	100	90	80	137	125	107	100
35	110	100	86	80	143	125	112	100	168	160	132	125
50	140	125	110	100	178	160	140	125	210	200	165	160
70	—	—	—	—	220	225	173	160	260	260	205	200
95	—	—	—	—	265	260	210	200	310	300	245	225
120	—	—	—	—	310	300	245	225	365	350	285	260
150	—	—	—	—	355	350	280	260	415	430	330	300
185	—	—	—	—	405	350	320	300	475	430	375	350
240	—	—	—	—	480	430	380	350	560	500	440	430
300	—	—	—	—	555	—	435	—	645	—	510	—
400	—	—	—	—	—	—	—	—	770	—	605	—
500	—	—	—	—	—	—	—	—	880	—	690	—

Stromversorgung



Dreiphasenverbraucher-Richtgrößen für die Motorenleistung von elektrisch betriebenen Baumaschinen

Tabelle 2-5: Motorleistung von Baumaschinen [4]

Baumaschine	Kenngrösse	Motorleistung
Turmkrane	Nennlastmoment	
fahrbar	7 – 45 tm	15.0 – 33.0 kW
stationär	32 – 1250 tm	20.0 – 145.0 kW
Aufzug	Traglast	
Schnellbauaufzug	0.2 – 1.0 t	2.0 – 10.0 kW
Aufzug mit Fahrkorb	0.5 – 3.2 t	8.0 – 30.0 kW
Betonmischmaschine	Mischgefässinhalt	
Trommelmischer	250 – 750 l	5.0 – 15.0 kW
Trog- / Tellermischer	150 – 240 l	3.0 – 8.0 kW
	750 – 4500 l	19.0 – 35.0 kW
Betonmischanlage	Mischgefässinhalt	
Trog- / Tellermischer	500 – 2000 l	20.0 – 80.0 kW
Trog- / Tellermischer	2000 – 4500 l	80.0 – 130.0 kW
Kompressor	Volumenstrom	
Kleinkompressor	0.04 – 1.65 m ³ /min	0.4 – 15.0 kW
Kolbenkompressor	2.0 – 9.0 m ³ /min	15.0 – 65.0 kW
Schraubenkompressor	3.0 – 19.0 m ³ /min	20.0 – 130.0 kW
Kreissäge	Sägeblattdurchmesser	
Tischkreissäge	350 – 550 mm	2.0 – 9.0 kW
Handkreissäge	170 – 550 mm	0.6 – 4.0 kW
Förderband	Achsabstand	
500 mm Gurtbreite	4.0 – 15.0 m	1.0 – 2.0 kW
650 mm Gurtbreite	10.0 – 60.0 m	5.5 – 15.0 kW
Rüttler		
Aussenrüttler	Fliehkraft	
	1.0 – 25.0 kN	0.1 – 3.0 kW
Innenrüttler	Flaschendurchmesser	
	17.0 – 60.0 mm	0.6 – 3.0 kW

Stromversorgung



Zwei- und Dreiphasenverbraucher-Richtgrößen für die Anschlusswerte von Elektrogeräten und Beleuchtung

Tabelle 2-6: Anschlusswerte diverser Elektrogeräte [17]

Elektrogerät	Wechselstrom	Drehstrom	Anschlusswert
Elektroherd		x	8.0 – 14.0 kW
Kaffeemaschine	x		1.0 kW
Wasserkocher	x		1.0 kW
Duschspeicher 30 l		x	6.0 kW
Boiler 80 l		x	6.0 kW
Durchlauferhitzer		x	10.0 – 30.0 kW
Waschmaschine	x		3.0 kW
Wäschetrockner	x		3.0 kW
Händetrockner	x		2.0 kW
Kühlschrank	x		0.2 kW
Geschirrspüler	x		3.5 kW
Heizlüfter	x		2.0 kW

Tabelle 2-7: Anschlusswerte verschiedener Beleuchtungskörper [17]

Beleuchtung	Anschlusswert
Glühlampe	0.025 – 0.1 kW
Flutlichtlampen	0.2 kW
Tiefstrahler	1.0 kW
Kranleuchten	1.0 kW

Stromversorgung



Beispiel zur Ermittlung des Anschlusswerts einer Baustelle

- Zusammenstellung der eingesetzten Baumaschinen**

Tabelle 2-8: Motorleistung diverser Baumaschinen nach [4]

Stück	Baumaschine	Motorleistung [kW]	
		Einzeln	Gesamt
1	Turmkran	45.0	45.0
2	Kompressor	40.0	80.0
1	Trommelmischer	15.0	15.0
1	Förderband	15.0	15.0
1	Tischkreissäge	4.0	4.0
2	Handkreissäge	1.7	3.4
1	Aussenrüttler	0.5	0.5
2	Innenrüttler	1.2	2.4
Gesamt		=	165.3 kW

- Zusammenstellung der eingesetzten Elektrogeräte**

Tabelle 2-9: Anschlusswerte diverser Elektrogeräte nach [4]

Stück	Elektrogerät	Anschlusswert [kW]	
		Einzeln	Gesamt
2	Kaffeemaschine	1.0	2.0
2	Wasserkocher	1.0	2.0
1	Kühlschrank	0.2	0.2
2	Heizlüfter	2.0	4.0
Gesamt		=	8.2 kW

Stromversorgung



- Zusammenstellung der eingesetzten Beleuchtung**

Tabelle 2-10: Berechnungsbeispiel der eingesetzten Beleuchtungen [4]

Stück	Beleuchtung	Anschlusswert [kW]	
		Einzeln	Gesamt
20	Flutlichtlampe	0.2	4.0
4	Tiefstrahler	1.0	4.0
1	Kranleuchte	1.0	1.0
100 m ² Unterkünfte; 1 Glühlampe je 5 m ²		0.06	100/5 × 0.06 = 1.2
Gesamt		=	10.2 kW

- Weitere Ausgangsdaten**

Motorwirkungsgrad η = 0.85
 Leistungsfaktor $\cos \varphi$ = 0.6 $\Rightarrow \varphi = 53.1^\circ \Rightarrow \sin \varphi = 0.8$
 Gleichzeitigkeitsfaktor a = 0.6

- Leistungsaufnahme der Baumaschinen**

$$P_{zu} = \frac{140.3}{0.85} = 165.06 \text{ kW}$$

- Leistungsbereitstellung des Netzes**

Scheinleistung Baumaschinen $P_{S1} = \frac{165.06}{0.6} = 275.10 \text{ kVA}$

Scheinleistung Elektrogeräte $P_{S2} = 8.2 \text{ kVA}$

Scheinleistung Beleuchtung $P_{S3} = 10.2 \text{ kVA}$

Gesamtscheinleistung

$$P_{Sges} = \sqrt{(275.10 \times 0.6 + 8.2 + 10.2)^2 + (275.10 \times 0.8)^2} = 286.52 \text{ kVA}$$

- Gesamtanschlusswert**

$$P_{AW} = 286.52 \times 0.6 = 171.91 \text{ kVA}$$

Stromversorgung



Beispiel zur Dimensionierung der elektrischen Versorgungsleitungen [17], [20]

- **Annahmen**

Bewegliche Verteilerleitung frei in Luft verlegt	
Motorleistung des Verbrauchers (Kran) P_K	= 45 kW
Wirkungsgrad des Motors η	= 0.80
Gleichzeitigkeitsfaktor (hoch, da Einzelgerät) a	= 0.85
Leistungsfaktor $\cos \varphi$	= 0.70
Leitungslänge (Verteiler – Verbraucher) l_L	= 30 m
Leitfähigkeit (Kupferkabel) χ	= 57 m/ Ω mm ²
Spannung U , Dreiphasenwechselstrom	= 400 V
Zulässiger Spannungsabfall zwischen Verteiler und Verbraucher ΔU	= 2.5 % (10V)

- **Aufgenommene Wirkleistung**

$$P_W = \frac{45}{0.80} = 56.25 \text{ kW}$$

- **Massgebend für die Bemessung**

$$P_{AW} = 56.25 \times 0.85 = 47.81 \text{ kW}$$

- **Erforderlicher Leitungsquerschnitt gemäss dem zulässigen Spannungsabfall**

$$A_{\text{erf}} = \frac{47.81 \times 30 \times 10^3}{57 \times 10 \times 400} = 6.3 \text{ mm}^2$$

- **Erforderlicher Leitungsquerschnitt gemäss der thermischen Belastbarkeit**

$$I = \frac{47.81 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.7} = 98.58 \text{ A}$$

Gemäss Tabelle 2-4 ist für einen höchstzulässigen Nennstrom der Stromsicherung von $I = 100 \text{ A}$ ein Nennquerschnitt von $A_{\text{erf}} = 25 \text{ mm}^2$ notwendig.

- **Gewählter Querschnitt**

vieradrige Kupferleitung mit Querschnitt $4 \times 25 \text{ mm}^2$ (Dreiphasenwechselstrom)

Stromversorgung

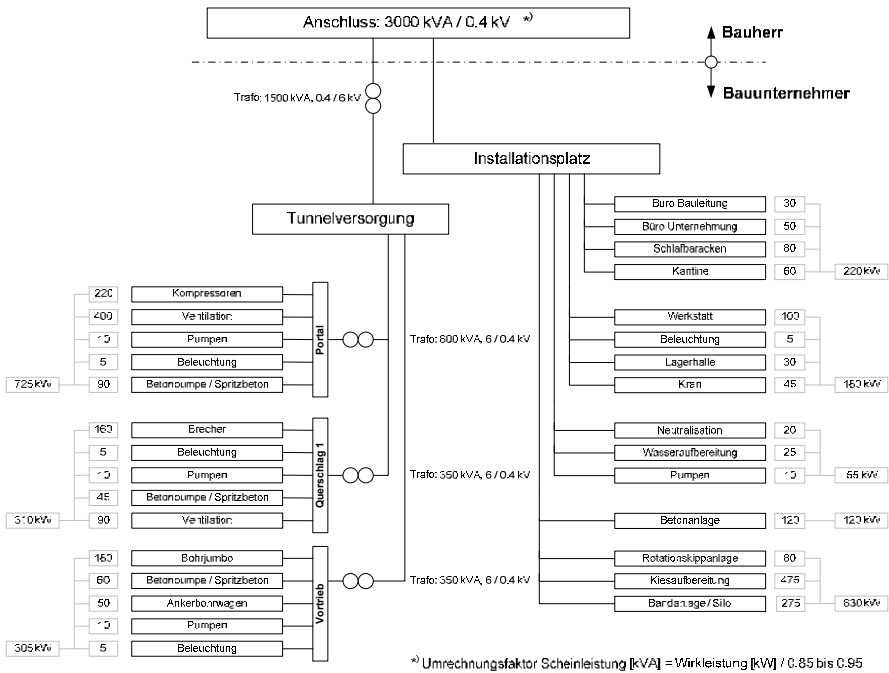


Bild 2-3: Elektroinstallationschema einer Baustelle (Tunnelbau, konventioneller Vortrieb) [2]

Druckluftversorgung



2.4 Druckluftversorgung

Aus der allgemeinen Gasgleichung:

$$\frac{p_A \times V_A}{T_A} = \frac{p_B \times V_B}{T_B}$$

p_A	Druck im Punkt A des Systems	[bar]
V_A	Volumen des Gases im Punkt A	[m ³]
T_A	Temperatur des Gases im Punkt A	[K]
p_B	Druck im Punkt B des Systems	[bar]
V_B	Volumen des Gases im Punkt B	[m ³]
T_B	Temperatur des Gases im Punkt B	[K]

lässt sich die Volumenstromgleichung für Druckluftsysteme wie folgt darstellen:

$$\frac{p_0 \times Q_{N,Saug}}{T_0} = \frac{p_K \times Q_{N,K}}{T_K} = \frac{p_V \times Q_{N,V}}{T_V}$$

p_0	Luftdruck am Ansaugstutzen	[bar]
$Q_{N,Saug}$	Ansaugleistung bei Luftdruck p_0	[m ³ /min]
T_0	Lufttemperatur am Ansaugstutzen (Aussentemperatur)	[K]
p_K	Abgabeluftdruck am Kompressor ins Druckleitungs- system	[bar]
$Q_{N,K}$	Abgabeleistung des Kompressors bei Druck p_K	[m ³ /min]
T_K	Drucklufttemperatur am Kompressor	[K]
p_V	Betriebsdruck des Verbrauchers	[bar]
$Q_{N,V}$	Druckluftbedarf aller Verbraucher bei Druck p_V	[m ³ /min]
T_V	Drucklufttemperatur im Verbraucher	[K]

Die Volumenstromgleichung lässt sich überleiten zu:

$$Q_{N,K} = Q_{N,V} \times \frac{p_V}{p_K} \times \frac{T_K}{T_V} \quad [\text{m}^3/\text{min}]$$

mit $p_K = p_V + \Delta p$ (Δp entspricht den Druckverlusten entlang der Leitung) und $Q_{N,V}$ (Summe des Druckluftbedarfs aller Verbraucher), hierin sind die Leistungsfaktoren k_i und η_G bereits berücksichtigt.

Druckluftversorgung

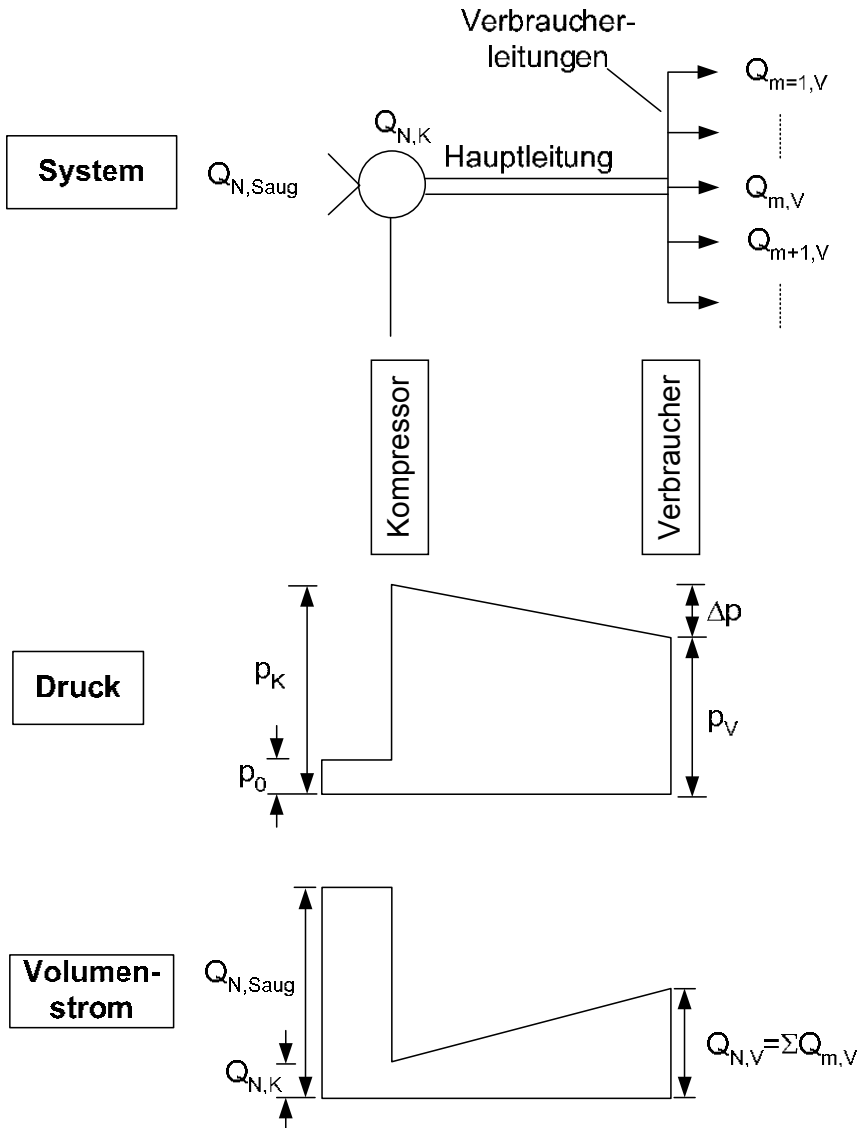
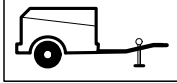


Bild 2-4: Druckverlauf eines Druckluftsystems

Druckluftversorgung



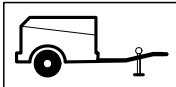
Der **Druckluftbedarf** $Q_{N,V}$ [m^3/min] aller Verbraucher setzt sich zusammen aus:

$Q_{N,V} = \sum_m Q_{m,V} \times \prod_i k_i \times \eta_G$		[m^3/min]
$k_1 = 1$		[-]
$k_2 = f_p \times f_v \times f_s \times f_u$		[-]
$k_3 = 1$		[-]
$\eta_G = 1$		[-]
$Q_{N,V}$	Druckluftbedarf aller Verbraucher bei Druck p_v	[m^3/min]
$Q_{m,V}$	Druckluftbedarf des Verbrauchers m bei Druck p_v	[m^3/min]
k_1	nicht massgebend	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	nicht massgebend	[-]
f_p	Abweichungsfaktor des effektiven Arbeitsdrucks	[-]
f_v	Faktor zur Berücksichtigung des Verschleisses von Geräten und Werkzeugen	[-]
f_s	Gleichzeitigkeitsfaktor für Betrieb mehrerer Geräte	[-]
f_u	Faktor zur Berücksichtigung von Verlusten durch undichte Leitungen	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Hieraus lassen sich die Gleichungen für die **Abgabeleistung** $Q_{N,K}$ [m^3/min] des Kompressors und die **Ansaugleistung (Volumenstrom)** $Q_{N,\text{Saug}}$ [m^3/min] bei Luftdruck p_0 wie folgt darstellen:

$Q_{N,K} = Q_{N,V} \times \frac{p_v}{p_K} \times \frac{T_K}{T_v}$		[m^3/min]
$Q_{N,\text{Saug}} = Q_{N,V} \times \frac{p_v}{p_0} \times \frac{T_0}{T_v}$		[m^3/min]
$Q_{N,K}$	Abgabeleistung des Kompressors bei Druck p_K	[m^3/min]
p_v	Betriebsdruck des Verbrauchers	[bar]
p_K	Abgabeluftdruck am Kompressor ins Druckleitungssystem	[bar]
T_K	Drucklufttemperatur am Kompressor ins Druckleitungssystem	[K]
T_v	Drucklufttemperatur im Verbraucher	[K]
$Q_{N,\text{Saug}}$	Ansaugleistung (Volumenstrom) bei Luftdruck p_0	[m^3/min]

Druckluftversorgung



p_0	Luftdruck am Ansaugstutzen (atmosphärischer Druck)	[bar]
T_0	Lufttemperatur am Ansaugstutzen (Aussentemperatur)	[K]

In der Praxis kann vereinfachend angenommen werden, dass die Temperaturdifferenzen innerhalb des Druckluftsystems gering sind und somit die Quotienten $\frac{T_K}{T_V}$ bzw. $\frac{T_0}{T_V}$ vernachlässigt werden können.

Der **Leistungseinflussfaktor** k_2 [-] setzt sich aus vier Einzelkorrekturfaktoren zusammen:

Abweichungsfaktor für effektiven Arbeitsdruck f_p [-]

Tabelle 2-11: Abweichungsfaktor f_p [-]

Druck [bar]	f_p [-]
5	0.83
6	1.00
7	1.17

Verlustfaktor zur Berücksichtigung des Verschleißes von Geräten und Werkzeugen f_v [-]

Tabelle 2-12: Verlustfaktor f_v [-]

Zustand	f_v [-]
gut erhalten	1.05
ältere Geräte	1.10

Druckluftversorgung



Gleichzeitigkeitsfaktor für den Betrieb mehrerer Geräte f_s [-]

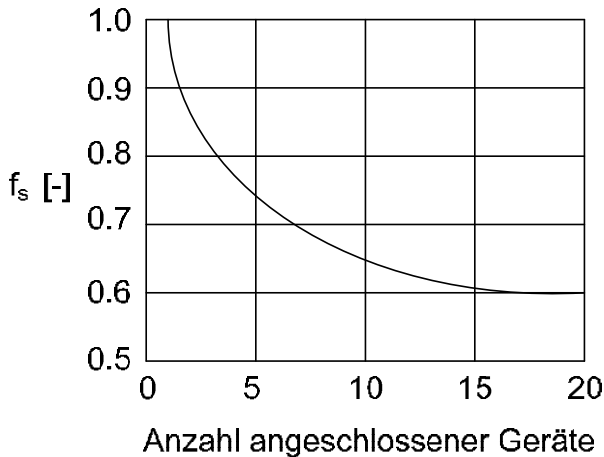


Bild 2-5: Gleichzeitigkeitsfaktor f_s [-] für Kompressoren [21]

Faktor zur Berücksichtigung von Verlusten durch undichte Leitungen f_u [-]

Tabelle 2-13: Verlustfaktor f_u [-] - Undichtigkeiten

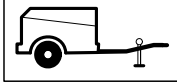
Leitungszustand	f_u [-]
gut	1.2 – 1.3
schlecht	nach oben unbegrenzt

Druckluftbedarf $Q_{m,v}$ [m³/min] einiger Geräte

Tabelle 2-14: Druckluftbedarf $Q_{m,v}$ [4]

Gerät	Gewicht [kg]	Druckluftbedarf bei 6 bar $Q_{m,v}$ [m ³ /min]
Pick- und Abbauhämmer	5 – 10	0.8 – 1.0
	11 – 20	0.8 – 1.2
	21 – 40	0.2 – 4.0
Bohrhämmer	15 – 25	0.2 – 4.0
Drehschlagbohrmaschinen	80 – 110	8.0 – 10.0
	ca. 150	11.0 – 12.0

Druckluftversorgung



Bemessung der Rohrleitung

Die **inneren Verluste Δp [bar]** des Druckleitungssystems durch Reibung an Einbauteilen und Rohrrinnenflächen

$$\Delta p = p_K - p_V \quad [\text{bar}]$$

werden oft durch äquivalente Rohrleitungslängen ausgedrückt.

Die **Nennlänge L_{Nenn} [m]** kann daher wie folgt angegeben werden:

$$L_{\text{Nenn}} = \sum_i L_i \quad [\text{m}]$$

L_{Nenn}	Nennlänge der Druckluftleitung	[m]
L_i	äquivalente Rohrleitungslänge des Einbauteils i zur Berücksichtigung der Reibung	[m]
i	Einbauteil in Rohrleitung	[-]

Die Nennlänge eines Druckleitungssystems setzt sich zusammen aus der wahren Länge der Rohre plus äquivalenten Rohrleitungslängen L_i für druckverzehrende Einbauteile. Die Nennlänge kann auch vereinfacht als 1.5-mal wahre Länge angenommen werden. [22]

Äquivalente Rohrleitungslänge L_i [m] für einige Einbauteile:

Tabelle 2-15: Äquivalente Rohrleitungslängen L_i [m] [23]

Einbauteil i	äquivalente Rohrleitungslänge zur Berücksichtigung der Reibung L_i [m]
Rohrleitung	tatsächliche Länge
Absperrventil	16
Bogen 90°	5
Bogen 30°	3
Absperrschieber	3

Druckluftversorgung



Die Bemessung der Druckluftleitung, z.B. Hauptleitung bzw. Leitungsabschnitte j, erfolgt mittels Bild 2-6:

$$d = f\{Q_{N,\text{Saug}}; L_{\text{Nenn}}\} \quad [\text{mm}]$$

$$d_j = f\{Q_{N,j}; L_{\text{Nenn},j}\} \quad [\text{mm}]$$

d	Rohrleitungsdurchmesser	[mm]
L_{Nenn}	Nennlänge der Druckluftleitung	[m]
$Q_{N,\text{Saug}}$	Ansaugleistung bei Luftdruck p_0	[m ³ /min]
j	Rohrleitungsabschnitte	[-]

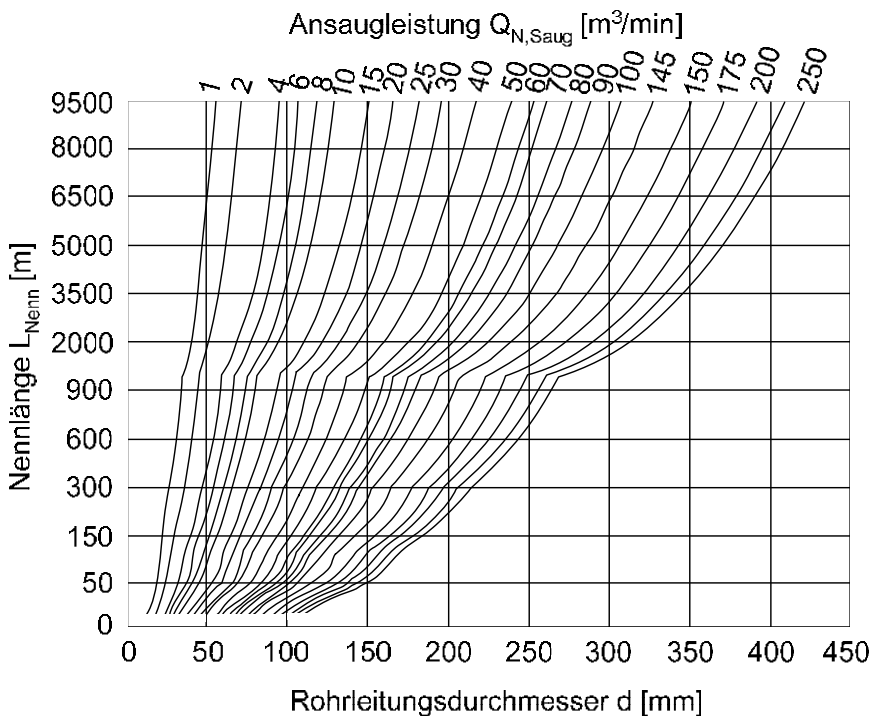


Bild 2-6: Bemessungsdiagramm für Druckleitungen [23]



2.5 Separationsanlagen

Die **maximal anfallende Separationsmenge** $Q_{\text{fest},i}$ [t/h] bzw. die **maximal anfallende Beladung** $\mu_{\text{fest},i}$ [t/m³] der Suspension mit Feststoffen für den definierten Korndurchmesserbereich / das Separationsintervall i ergibt sich aus:

$Q_{\text{fest},i} = \Delta s_i \times \rho_b \times Q_0^{\text{max}}$	[t/h]
$\mu_{\text{fest},i} = \Delta s_i \times \left(\frac{Q_0^{\text{max}} \times \rho_b}{Q_F} \right)$	[t/m ³]
$Q_{\text{fest},i}$	anfallende Separationsmenge für das Separationsintervall i [t/h]
Δs_i	maximal anfallende Gewichtsprozent der separierbaren Böden im Separationsintervall i [Gew.-%]
ρ_b	Dichte des abzubauenden Bodens (ungestört) [t/fm ³]
Q_0^{max}	maximaler Materialanfall (Abbauleistung z.B. der TVM) [fm ³ /h]
$\mu_{\text{fest},i}$	maximale Beladung der Suspension mit Feststoffen des Separationsintervalls i [t/m ³]
Q_F	Trägermediummenge vor Aufgabe des Abbaumaterials (Fördermenge der unbeladenen Förderflüssigkeit) [m ³ /h]
i	Separationsintervall [-]

Die erforderliche Separationsleistung ist abhängig von:

- der Sieblinie des abzubauenden Bodens
- der Förderleistung der Pumpeinrichtung zur Abförderung des Abbaumaterials (Aufgabemenge)
- dem Beladungsverhältnis der Suspension
- der Dichte des Bodens

Separationsanlagen



Maximal anfallende Gewichtsprozent des Bodens im Separationsintervall i Δs_i [Gew.-%]

$$\Delta s_i = \max \{ \Delta s_{i,j} \} \text{ aller } j \quad [\text{Gew.-%}]$$

$$\Delta s_{i,j} = \max s_{i,j} - \min s_{i,j} \quad [\text{Gew.-%}]$$

Δs_i	maximal anfallende Gewichtsprozent der separierbaren Böden im Separationsintervall i , aller betrachteten Sieblinien j	[Gew.-%]
$\Delta s_{i,j}$	Gewichtsprozent der Sieblinie j im Separationsintervall i	[Gew.-%]
$\max s_{i,j}$	maximaler Massenanteil der Sieblinie j im Separationsintervall i	[Gew.-%]
$\min s_{i,j}$	minimaler Massenanteil der Sieblinie j im Separationsintervall i	[Gew.-%]
i	Separationsintervall	[-]
j	Sieblinie (z.B. bei in verschiedenen Abschnitten des Tunnellängsprofils auftretenden Bodenschichten)	[-]

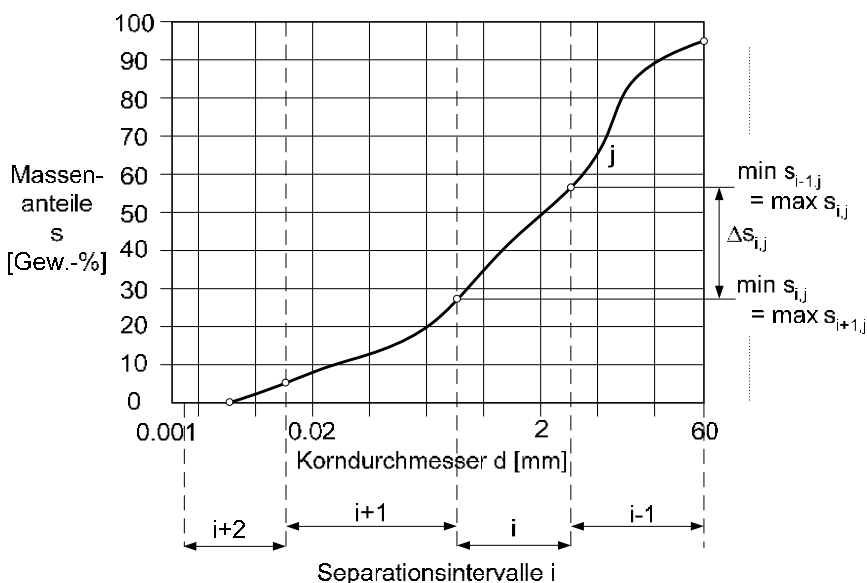


Bild 2-7: Darstellung einer Sieblinie j zur Erklärung der verwendeten Begriffe



Beispiel zur Bestimmung der Gewichtsprozente $\Delta s_{i,j}$ des Separationsintervalls i des anfallenden Bodens in den Sieblinien j und den maximal anfallenden Gewichtsprozenten Δs_i aller anfallenden Böden

Es wird eine Tunnelbaumassnahme mit idealisierten Schichtgrenzen zwischen den Böden gleicher Sieblinie betrachtet.

Für jeden Bereich der Baumassnahme lässt sich eine repräsentative Sieblinie darstellen. Die Sieblinien werden in die Separationsintervalle aufgeteilt. Aus den Schnittpunkten der Sieblinien mit den Grenzen der Separationsintervalle lassen sich die Massenanteile $\max s_{i,j}$ bzw. $\min s_{i,j}$ der verschiedenen Separationsintervalle und Sieblinien ablesen; hier im Beispiel dargestellt für das Separationsintervall 2 der Sieblinie C, $\max s_{2,C}$ und $\min s_{2,C}$.

Die Gewichtsprozente der Sieblinie j im Separationsintervall i $\Delta s_{i,j}$ ergeben sich somit aus der Differenz des maximalen und des minimalen Massenanteils der Sieblinie j im Separationsintervall i .

$\Delta s_{i,j} = \max s_{i,j} - \min s_{i,j}$ hier dargestellt für die Sieblinie C

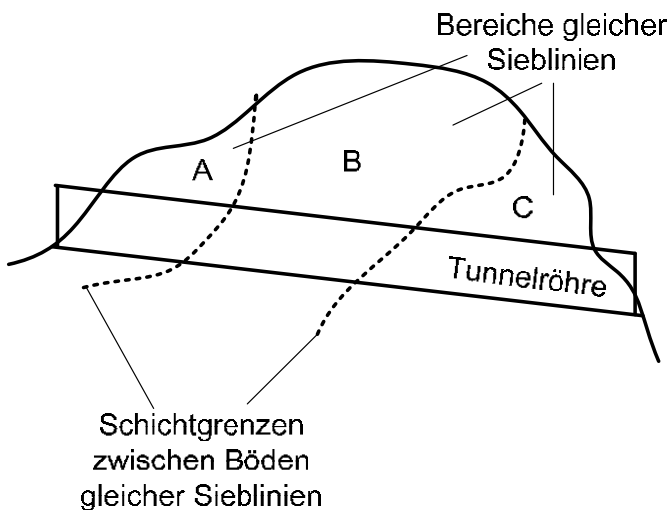


Bild 2-8: Beispiel einer Tunnelröhre in verschiedenen Böden

Separationsanlagen

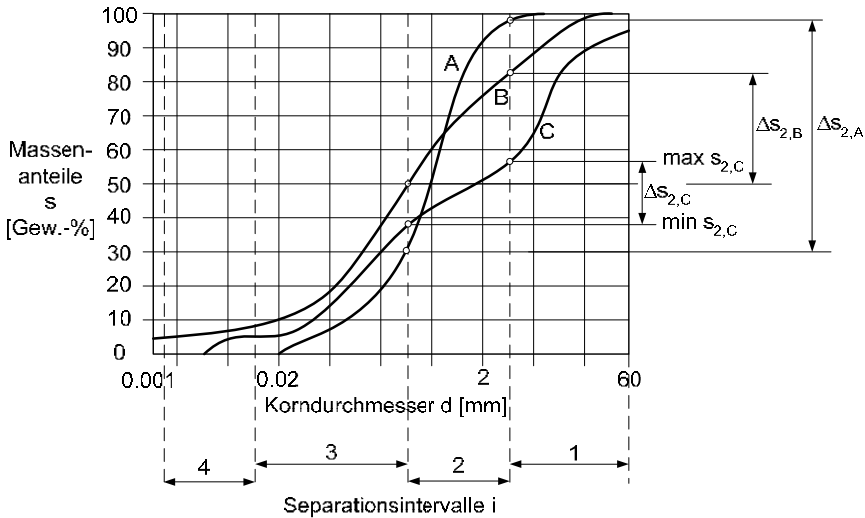


Bild 2-9: Sieblinien der anfallenden Böden mit Bestimmung der Gewichtsprozente

$$\Delta s_{2,A} = \max s_{2,A} - \min s_{2,A} = 98 - 30 = 68 \text{ Gew.-%}$$

$$\Delta s_{2,B} = \max s_{2,B} - \min s_{2,B} = 83 - 50 = 33 \text{ Gew.-%}$$

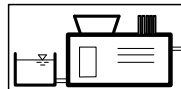
$$\Delta s_{2,C} = \max s_{2,C} - \min s_{2,C} = 57 - 38 = 19 \text{ Gew.-%}$$

Die maximal anfallenden Gewichtsprozente des Bodens im Separationsintervall 2 (dies ist gleichbedeutend mit dem Intervall zwischen der maximalen Korngrösse von ca. 3 mm und der minimalen Korngrösse von ca. 0.1 mm), Δs_2 , während der gesamten Baumassnahme ergibt sich aus dem Maximum aller zuvor bestimmten $\Delta s_{2,j}$ der anfallenden Böden der Sieblinien j:

$$\Delta s_2 = \max \{ \Delta s_{2,A}; \Delta s_{2,B}; \Delta s_{2,C} \} = \Delta s_{2,A} = 68 \text{ Gew.-%}$$

Dies bedeutet, dass im Bereich A der Baumassnahme mit dem grössten Anteil von zu separierenden Böden des Separationsintervalls 2 zu rechnen ist und daher die Aggregate für die Separationsstufe 2 (0.1 – 3 mm) der Separationsanlage für diese Mengen ausgelegt werden müssen.

Separationsanlagen



Die Separationsleistung der Separationsstufe 2 (Mitteltrennung I) muss somit wie folgt dimensioniert werden:

$$Q_{\text{fest},2} = \Delta s_{2,A} \times \rho_b \times Q_0^{\text{max}} \quad [\text{t/h}]$$

Definition: Beladungsverhältnis μ_{fest} [t/m^3]

Das Beladungsverhältnis der Förderflüssigkeiten entspricht der Masse des geförderten Feststoffs $Q_F \times \rho_b$ [t/h] pro Volumeneinheit des Trägermediums Q_F [m^3/h].

Berechnung der erforderlichen Separationsleistung

Es werden die Anteile der verschiedenen Separationsintervalle i der gesamten Sieblinie berechnet. Die Festlegung der verschiedenen Trennschnitte d_T der Separationsintervalle i sollte mit den einzelnen Klassifizierungsschritten der Separationsanlage (herstellerbedingt) korrelieren. Im Allgemeinen gelten folgende Trennschnitt-Korngrößen und die sich daraus ergebenden Separationsintervalle:

Tabelle 2-16: Einteilung möglicher Separationsintervalle nach [24]

Klassifizierung	Trennschnitt d_T [mm]	Separationsintervalle i [-]	Spannweite Separationsintervall [mm]
Grobtrennung	> 3	1	> 3
Mitteltrennung I	> 0.1	2	3 – 0.1
Mitteltrennung II	> 0.03	3	0.1 – 0.03
Feintrennung	> 0.005	4	0.03 – 0.005

Dimensionierung

Die einzelnen Anlageelemente der jeweiligen Separationsstufen werden nach den anfallenden Feststoffmengen je Separationsstufe i bemessen. Die Grösse und Anzahl der Anlageelemente je Separationsstufe ergibt sich aus dem Vergleich der erforderlichen Leistung (anfallende Menge $Q_{\text{fest},i}$) mit den entsprechenden Leistungsangaben $Q_{\text{fest},i,\text{Gerät}}^{\text{zul}}$ der Hersteller:

$$Q_{\text{fest},i} < Q_{\text{fest},i,\text{Gerät}}^{\text{zul}} \quad \text{für alle } i\text{-Separationsstufen}$$

Separationsanlagen



Ferner muss für das Gesamtsystem gelten:

$$\rho_b \times Q_0^{\max} \leq \sum Q_{\text{fest},i,\text{Gerät}}^{\text{zul}}$$

Maximaler Feststoffdurchsatz des Separationssystems, bestehend aus den Separationsleistungen der einzelnen Anlageelemente der Separationsstufen

Manche Hersteller geben auch die **maximale Beladung** $\mu_{\text{fest},i,\text{Gerät}}^{\text{zul}}$ [t/m^3] **der einzelnen Anlageelemente der Separationsstufen** für die Dimensionierung an. Für alle Anlageelemente und somit Separationsintervalle muss gelten:

$$\mu_{\text{fest},i} < \mu_{\text{fest},i,\text{Gerät}}^{\text{zul}} \quad \text{für alle } i\text{-Separationsstufen}$$

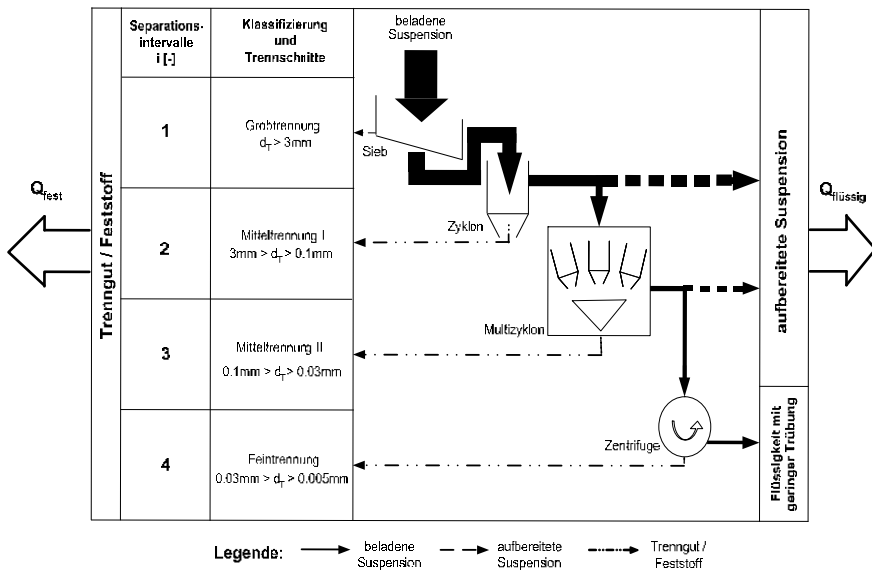


Bild 2-10: Schematische Darstellung einer vierstufigen Separationsanlage

3 Erdbaugeräte

Hydraulikbagger

Radlader

Kettenlader (Laderaupen)

Planiergeräte:

Rad- und Raupenplaniergeräte

Scraper

Grader

Verdichtungsgeräte



3.1 Hydraulikbagger

Nutzleistung Q_N [fm^3/h] eines Hydraulikbaggers

$Q_N = \frac{V_{SAE}}{t_S} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$		[fm^3/h]
$k_1 = \alpha \times \varphi$		[-]
$k_2 = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5$		[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$		[-]
Q_N	Nutzleistung	[fm^3/h]
V_{SAE}	Nenninhalt des Grabgefässes gemäss SAE	[m^3]
t_S	Spielzeit	[s]
α	Lösefaktor	[fm^3/lm^3]
φ	Füllfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
f_1	Einfluss Grabentiefe bzw. Abbauhöhe	[-]
f_2	Schwenkwinkleinflussfaktor	[-]
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor	[-]
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
k_1	Ladefaktor	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Hydraulikbagger



Für den Hydraulikbagger steht neben dem Tieflöffel, dem Hochlöffel bzw. der Ladeschaufel und dem Greifer eine Vielzahl weiterer Arbeitseinrichtungen zur Verfügung.

Bei Grabungsarbeiten unterhalb der Aufstandsfläche des Baggers, z.B. bei Gräben, finden vor allem der Tieflöffel und der Teleskopgreifer Anwendung. Der Bagger arbeitet dann mit seinem kinematischen Ausleger von oben und bewegt sich rückwärts. Steht er hingegen vor einer abzugrabenden Böschung auf der Aushubsohle, so kommen entweder der Hochlöffel, die Ladeschaufel oder auch die Klappschaufel zum Einsatz. Der Bagger arbeitet dabei mit seinem kinematischen Ausleger stets von unten nach oben sowie vom Gerät weg und bewegt sich im Verlauf des Arbeitsfortschrittes vorwärts.

Spielzeit t_s [s]

Die Spielzeit setzt sich zusammen aus dem Füllen des Löffels, dem Heben und Schwenken zum Entladeort, dem Entleeren des Löffels und dem Rückschwenken und Senken zum Beladeort. Um hier eine Vereinheitlichung der Zeiten zu erhalten, wird die Spielzeit unter gewissen optimalen technischen Normbedingungen gemessen: ungestörter Einsatz, Entladen auf Halde, Schwenkwinkel 90° , pausenlose Arbeit, eingearbeiteter Baggerführer, günstige Abbauhöhe [5], [6]. Ausserdem ist die Spielzeit von der zu grabenden und ladenden Bodenart abhängig, so dass der Vorgang des Füllens des Löffels beträchtlichen Zeitschwankungen unterworfen ist.

Teilzeiten im Arbeitsspiel eines Baggers:

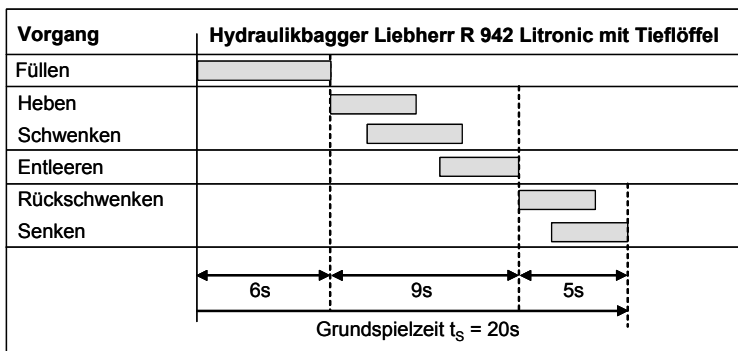


Bild 3-1: Spielzeit t_s eines Hydraulikbaggers Liebherr R 942 Litronic mit Tieflöffel nach [5] unter optimalen technischen Bedingungen



Systemgerechter Hydraulikbaggereinsatz

Der systemgerechte Einsatz von Hydraulikbaggern setzt folgende Randbedingungen voraus:

- günstige Anschnitthöhe $h_{\text{gün}}$ (Grabentiefe/Abbauhöhe zu Stiellänge)
- kleinstmöglicher Schwenkwinkel $< 90^\circ$
- Fördermittel soll in der Regel auf der Baggersohle stehen
- Abstimmung der Fördermittelgrösse auf die Grabgefässgrösse
- Schnittaufteilung (optimale Bestreichfläche des Löffels) ohne ungünstige Restschnitte und mit guter Möglichkeit des Abtransports
- Minimierung der Baggerfortbewegung (Standortwechsel)
- Rundfahrbetrieb der Transportfahrzeuge, kontinuierliches Baggern
- Maximalleistungen bei Baggern werden erfahrungsgemäss erzielt, wenn der Schnitt (Bestreichfläche des Löffels) mit 75 % der konstruktiv möglichen Daten [6] angelegt und somit die optimale Schnitthöhe erreicht wird.

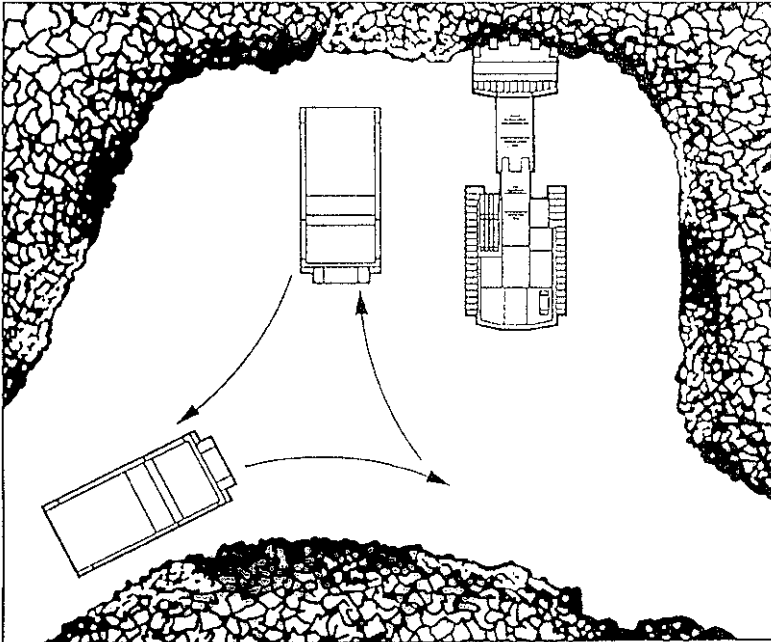


Bild 3-2: Optimaler Einsatz Bagger – LKW [6]

Hydraulikbagger

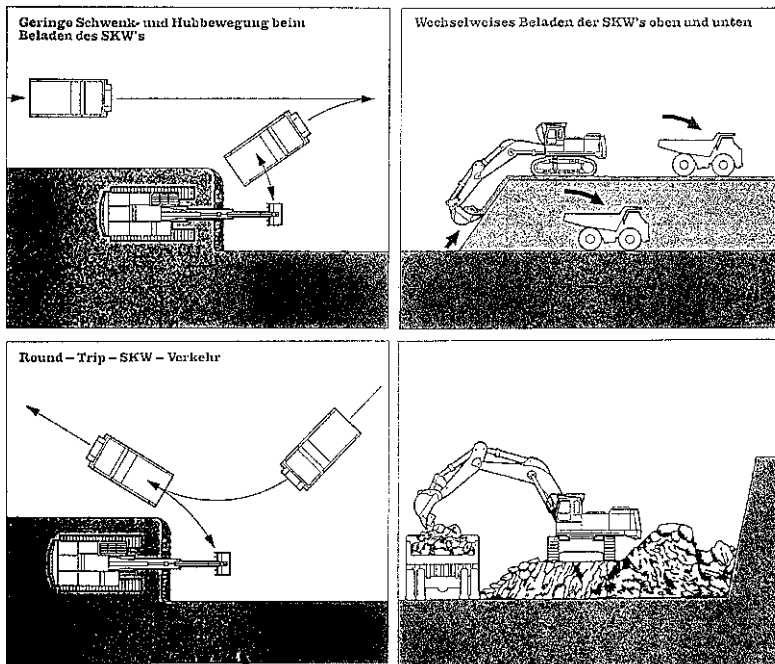


Bild 3-3: Ideale Tieflöffeleinsätze [6]

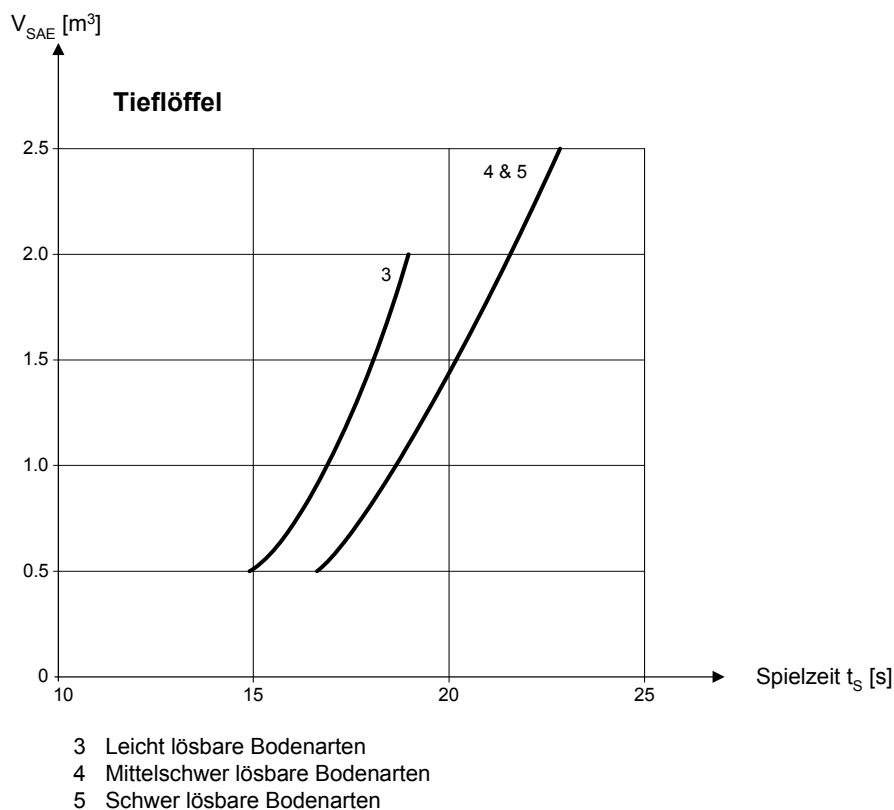


Bild 3-4: Spielzeit t_s [s] von Baggern mit Tieflöffel in verschiedenen Bodenarten in Anlehnung an die DIN 18300 nach [25], [26]

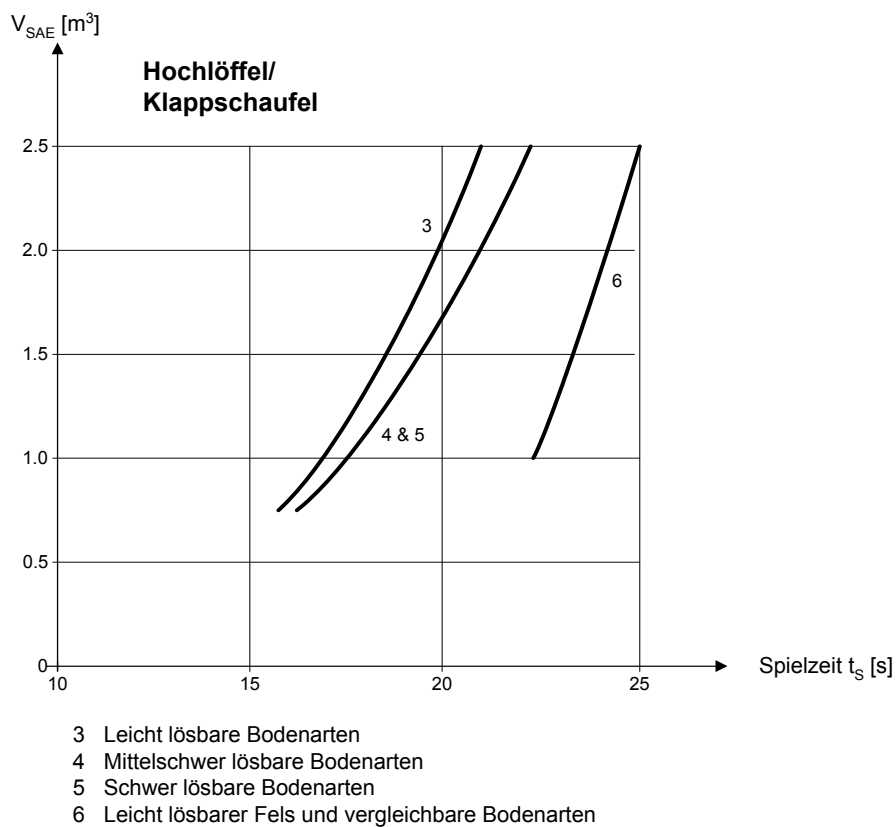


Bild 3-5: Spielzeit $t_s [s]$ von Baggern mit Hochlöffel/Klappschaufel in verschiedenen Bodenarten in Anlehnung an die DIN 18300 nach [25], [26]



3.2 Radlader

Nutzleistung Q_N [fm^3/h] eines Radladers

$Q_N = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_S} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[fm^3/h]
$k_1 = \alpha \times \varphi$	[-]
$k_2 = f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]
Q_N	Nutzleistung [fm ³ /h]
V_{SAE}	Nenninhalt des Ladegefässes gemäss SAE [m ³]
t_S	Spielzeit [s]
α	Lösefaktor [fm ³ /lm ³]
φ	Füllfaktor [-]
η_1	Bedienungsfaktor [-]
η_2	Betriebsbedingungen [-]
f_2	Fahrwegfaktor [-]
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor [-]
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor [-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor [-]
k_1	Ladefaktor [-]
k_2	Leistungseinflussfaktor [-]
k_3	Betriebsbeiwert [-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad [-]

Radlader



Spielzeit t_s [s]

$$t_s = t_{s0} + t_F + \Delta t \quad [s]$$

Die Spielzeit des Radladers [6], [7] kann unterteilt werden in:

- t_{s0} **Grundspielzeit:** Beinhaltet Laden, Auskippen, vier Fahrtrichtungswechsel und die kleinstmögliche Fahrstrecke. Die Grundspielzeit kann je nach Grösse des Radladers mit Knicklenkung zwischen 27 und 33 Sekunden angenommen werden (Bild 8-7).
- t_F **Fahrzeit:** Beinhaltet die für die Fahrstrecke benötigte Zeit bei Hin- und Rückfahrt ausserhalb des in Bild 8-7 dargestellten Manöverbereichs. In den Handbüchern von Liebherr [6] und Caterpillar [7] sind zu den einzelnen Radladertypen Diagramme der Fahrzeit der Hin- und Rückfahrt vorhanden.
- Δt **Änderung der Spielzeit:** Entsteht durch Abweichungen von den Normbedingungen der Grundspielzeit gemäss Tabelle 3-1.

Radlader



Tabelle 3-1: Änderung der Spielzeit Δt [s] eines Radladers nach [7]

Gerät	Δt [s]
mit Materialumschlag-ausrüstung	- 3.0
Material	
gemischt	+ 1.2
< 3 mm	+ 1.2
3 mm – 20 mm	- 1.2
20 mm – 150 mm	0.0
> 150 mm	+ 1.8 und mehr
gewachsene Wand oder gebrochenes Gestein	+ 2.4 und mehr
Haufwerk	
mit Förderband oder Dozer auf min. 3 m angehäuft	0.0 und mehr
mit Förderband oder Dozer auf max. 3 m angehäuft	+ 0.6 und mehr
mit LKW geschüttet	+ 1.2 und mehr
Verschiedenes	
LKW und Lader im gleichen Besitz	bis zu - 2.4
LKW im Fremdbesitz	bis zu + 2.4
ständiger Betrieb	bis zu - 2.4
zeitweiliger Betrieb	bis zu + 2.4
kleine Abladefläche	bis zu + 2.4
besondere Sorgfalt beim Abladen	bis zu + 3.0

Kettenlader (Laderaube)



3.3 Kettenlader (Laderaube)

Nutzleistung Q_N [fm^3/h] eines Kettenladers

$Q_N = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[fm^3/h]
$k_1 = \alpha \times \varphi$	[-]
$k_2 = f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]

Q_N	Nutzleistung	[fm^3/h]
V_{SAE}	Nenninhalt des Ladegefässes gemäss SAE	[m^3]
t_s	Spielzeit	[s]
α	Lösefaktor	[fm^3/lm^3]
φ	Füllfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
f_2	Fahrwegfaktor	[-]
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor	[-]
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
k_1	Ladefaktor	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Kettenlader (Laderaube)



Spielzeit t_S [s]

$$t_S = t_L + t_M + t_F + t_E + \Delta t \quad [s]$$

Die Spielzeit des Kettenladers [6], [7] kann unterteilt werden in:

- **t_L Ladezeit:** Ist abhängig von der Art des Bodens.
- **t_M Manövrierzeit:** Umfasst die Basisfahrzeit mit vier Richtungsänderungen und die Wendezeit.
- **t_F Fahrzeit:** Beinhaltet die für die Fahrstrecke benötigte Zeit bei Hin- und Rückfahrt.
- **t_E Entladezeit:** Wird von der Grösse der Entladestelle bestimmt.
- **Δt Änderung der Spielzeit**

Tabelle 3-2: Ladezeit t_L [s] nach [7]

Material	t_L [s]
gleichmässige Gesteinsmischung	1.8 – 3.0
feuchte, ungleichmässige Gesteinsmischung	1.8 – 3.6
feuchter Lehm	2.4 – 4.2
Erde, Steine, Wurzeln	2.4 – 12.0
stark bindige Materialien	6.0 – 12.0
zementgebundenes Material, gebrochener Fels	3.0 – 12.0

Manövrierzeit t_M [s]

Die Manövrierzeit beträgt bei voller Motorleistung und einem guten Fahrer 12 Sekunden.

Fahrzeit t_F [s]

Die Handbücher von Liebherr [6] und Caterpillar [7] enthalten Diagramme der Fahrzeit der Hin- und Rückfahrt zu den einzelnen Kettenladertypen.

Kettenlader (Laderaube)



Entladezeit t_E [s]

Die Entladezeit beträgt zwischen 0 und 6 Sekunden. Typische Werte für die Entladezeiten beim Beladen von LKWs liegen bei 2.5 bis 4.0 Sekunden.

Tabelle 3-3: Änderung der Spielzeit Δt [s] nach [7] - Kettenlader

Material	Δt [s]
gemischt	+ 1.2
< 3 mm	+ 1.2
3 mm – 20 mm	- 1.2
20 mm – 150 mm	0.0
> 150 mm	+ 2.0 und mehr
gewachsene Wand oder gebrochenes Gestein	+ 2.5 und mehr

Haufwerk

mit Förderband oder Dozer auf min. 3 m angehäuft	0.0
mit Förderband oder Dozer auf max. 3 m angehäuft	+ 0.6
mit LKW geschüttet	+ 1.2

Verschiedenes

LKW und Lader im gleichen Besitz	bis zu - 2.5
LKW im Fremdbesitz	bis zu + 2.5
ständiger Betrieb	bis zu - 2.5
zeitweiliger Betrieb	bis zu + 2.5
kleine Abladefläche	bis zu + 2.5
besondere Sorgfalt beim Abladen	bis zu + 3.0

Planiergeräte



3.4 Planiergeräte

Rad- und Raupenplaniergeräte, Scraper, Grader

Berechnungsalternative A

Grundschiebleistung $\tilde{Q}_0$ [lm^3/h]

$$\tilde{Q}_0(w) = \frac{V_{P100}}{t_U} \times 60 \times \varphi \times f_w(w) \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

mit:

$$V_{P100} = (0.5 \div 0.8) \times h^2 \times b \quad [\text{lm}^3]$$

$\tilde{Q}_0(w)$ Grundschiebleistung entfernungsabhängig, loses Material (Bild 3-6) [lm^3/h]

Nutzleistung (Dauerleistung) $\tilde{Q}_{PN}$ [lm^3/h] bezogen auf die Verteilung von losem Schüttmaterial:

$$\tilde{Q}_{PN}(w) = \frac{V_{P100}}{t_U} \times 60 \times \varphi \times k_2(w) \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

$$\tilde{Q}_{PN}(w) = \frac{V_{P100}}{t_U} \times 60 \times \varphi \times f_w(w) \times f_{1P} \times f_{2P} \times f_3(\beta) \times f_4 \times f_5 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

mit:

$$k_2 = \prod_{i=1}^5 f_i = f_{1P} \times f_{2P} \times f_3(\beta) \times f_4 \times f_5 \quad [-]$$

$$k_2(w) = \prod_{i=1}^5 f_i \times f_w(w) = k_2 \times f_w(w) \quad [-]$$

$$k_3 = \prod_{i=1}^2 \eta_i \cong 0.7 \quad [-]$$

Planiergeräte



folgt:

$$\tilde{Q}_{PN}(w) = \tilde{Q}_0(w) \times \prod_{i=1}^5 f_i \times \prod_{i=1}^2 \eta_i \times \eta_G \quad [lm^3/h]$$

$$\tilde{Q}_{PN}(w) = \tilde{Q}_0(w) \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [lm^3/h]$$

$\tilde{Q}_{PN}$	Nutzleistung loses Material	$[lm^3/h]$
$\tilde{Q}_0(w)$	Grundschiebleistung entfernungsabhängig, loses Material (Bild 3-6)	$[lm^3/h]$
V_{P100}	Schildschubkapazität	$[lm^3]$
t_U	Umlaufzeit	$[min]$
φ	Füllungsgrad des Schildes	$[-]$
$k_2(w)$	Leistungseinflussfaktor	$[-]$
k_3	Betriebsbeiwert	$[-]$
η_G	Geräteausnutzungsgrad	$[-]$
b	Breite des Schildes	$[m]$
h	Höhe des Schildes	$[m]$
w	Förderstrecke	$[m]$
f_{1P}	Schubbahnenfaktor (Schiebefaktor)	$[-]$
f_{2P}	Schildarteinflussfaktor (Schildeinrichtung)	$[-]$
$f_3(\beta)$	Steigungsfaktor	$[-]$
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	$[-]$
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	$[-]$
$f_w(w)$	entfernungsabhängiger Leistungsfaktor	$[-]$
η_1	Bedienungsfaktor 0.75 – 1.00	$[-]$
η_2	Betriebsbedingungen	$[-]$

Nutzleistung (Dauerleistung) Q_{PN} $[fm^3/h]$ bezogen auf Festmaterial:

$$Q_{PN}(w) = \frac{V_{P100}}{t_U} \times 60 \times \varphi \times \alpha \times k_2(w) \times k_3 \times \eta_G \quad [fm^3/h]$$

$$Q_{PN}(w) = \tilde{Q}_0(w) \times \alpha \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [fm^3/h]$$

α Lösefaktor des zu lösenden Materials $[fm^3/lm^3]$

Planiergeräte



Umlaufzeit t_U [min]

$t_U = t_H + t_R$		[min]
$t_H = \frac{l_H}{V_H}$; $t_R = \frac{l_R}{V_R}$		[min]
$Q_{PN}(w)$	Nutzleistung (Dauerleistung) bezogen auf Festmaterial	[fm ³ /h]
t_H	Hinfahrzeit unter Last, Verteilen des von den LKW abgeladenen Materials	[min]
t_R	Rückfahrzeit	[min]
l_H	Schub-/Fahrentfernung	[m]
V_H	Schub-/Fahrgeschwindigkeit	[m/min]
l_R	Strecke der Rückfahrt	[m]
V_R	Fahrgeschwindigkeit auf der Rückfahrt	[m/min]

Grundschubleistung $\tilde{Q}_0(w)$ [lm³/h]

Die Handbücher von Liebherr [6] und Caterpillar [7] enthalten Diagramme der maximalen Schubleistung (Einheit: Kubikmeter loses Material pro Stunde). Sie basieren auf folgenden Normbedingungen:

- 100 % Nutzung des Geräts
- keine Steigung
- Die Planierraupe schneidet 15 m weit an und schiebt die Schildfüllung zur Entleerung über eine steil abfallende Wand
- spezifisches Schüttgewicht 1400 kg/lm³
- Zugkraftkoeffizient 0.5 und grösser
- hydraulisch betätigte Planiereinrichtungen

Für die Berechnung der Leistung in Festkubikmeter muss die maximale Schubleistung mit dem Lösefaktor multipliziert werden.

Um die maximale Schubleistung zu erhalten, benötigt man für die Diagramme die durchschnittliche Länge der Abschubstrecke und den Modelltyp der Planierraupe (Leistung) mit dem entsprechenden Schild.

Planiergeräte

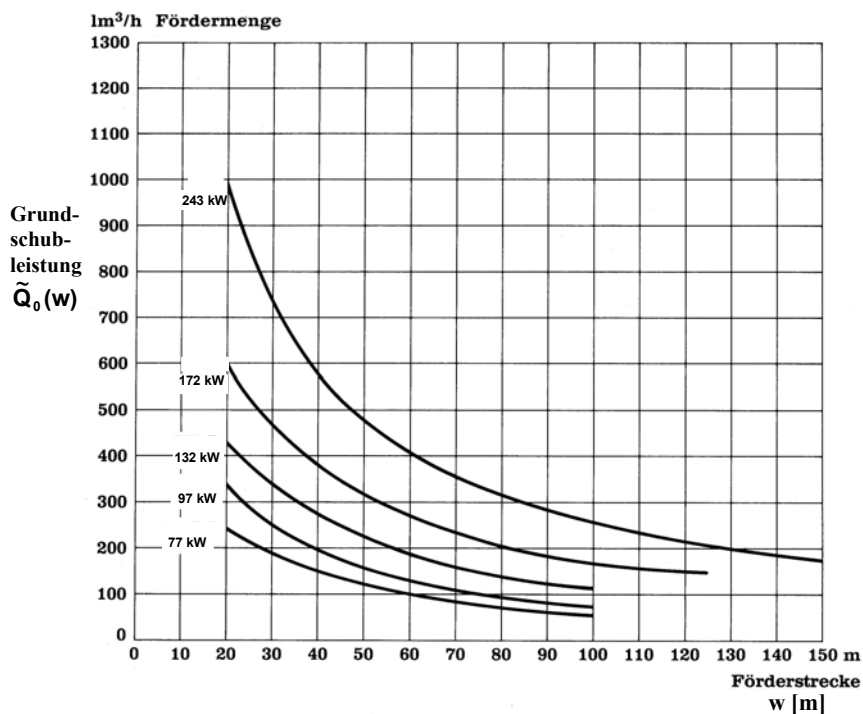
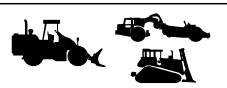


Bild 3-6: Schubleistung $\tilde{Q}_0(w)$ [m^3/h] von Planiertrauben [6]

Bild 3-6 zeigt die Grundschubleistung $\tilde{Q}_0(w)$ von Planiertrauben mit Brustschild in Abhängigkeit von der Förderstrecke w [m] ohne die Anschnittstrecke (ca. 15 m).

Planiergeräte



Tabelle 3-4: Faktoren im Erdbau nach [6]

Füllfaktor	ϕ [-]
loses Haufwerk	1.2
schwer zu lösen, gefroren	
mit Kippzylinder	0.8
ohne Kippzylinder	0.7
schwer zu schieben (trocken, nicht bindig)	0.6 – 0.8
sehr bindiges Material	0.6 – 0.8
Fels, gerissen oder gesprengt	0.6 – 0.8
Bedienungsfaktor	η_1 [-]
geübt	1.0
durchschnittlich	0.80
mässig	0.65
Betriebsbedingungen	η_2 [-]
Staub, Regen, Schnee, Nebel oder Dunkelheit	0.8
Schubbahnfaktor	f_{1P} [-]
in Bahnen	1.2
Schildarteinflussfaktor	f_{2P} [-]
U-Schild	1.2
Brustschild	1.0
Schwenkschild	0.5 – 0.75
Steigungsfaktor	$f_3(\beta)$ [-]
siehe nachfolgendes Diagramm	

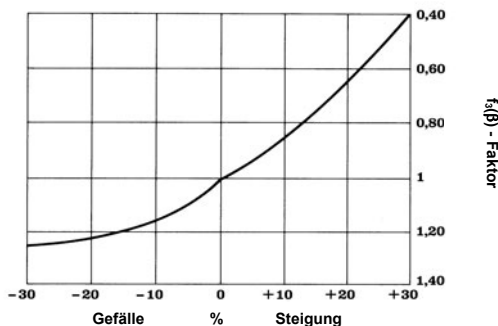


Bild 3-7: Steigungsfaktor $f_3(\beta)$ [6]

Planiergeräte



Erforderliche Anzahl von Planierraupen $n_{\text{Planierraupen}}$ [-]

$$n_{\text{Planierraupen}} \geq \frac{Q_{\text{TNERF-AT}}}{Q_{\text{PN}}} \quad [-]$$

$Q_{\text{TNERF-AT}}$ Transportfahrzeugleistung pro Arbeitstag

Gesamtleistung der eingesetzten Planierraupen $\sum Q_{\text{PN}}$ [lm^3/h]

$$\sum Q_{\text{PN}} = n_{\text{Planierraupen}} \times Q_{\text{PN}} \geq Q_{\text{TNERF-AT}} \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

Achtung: Die Gesamtleistung entweder auf festes oder auf loses Material beziehen.

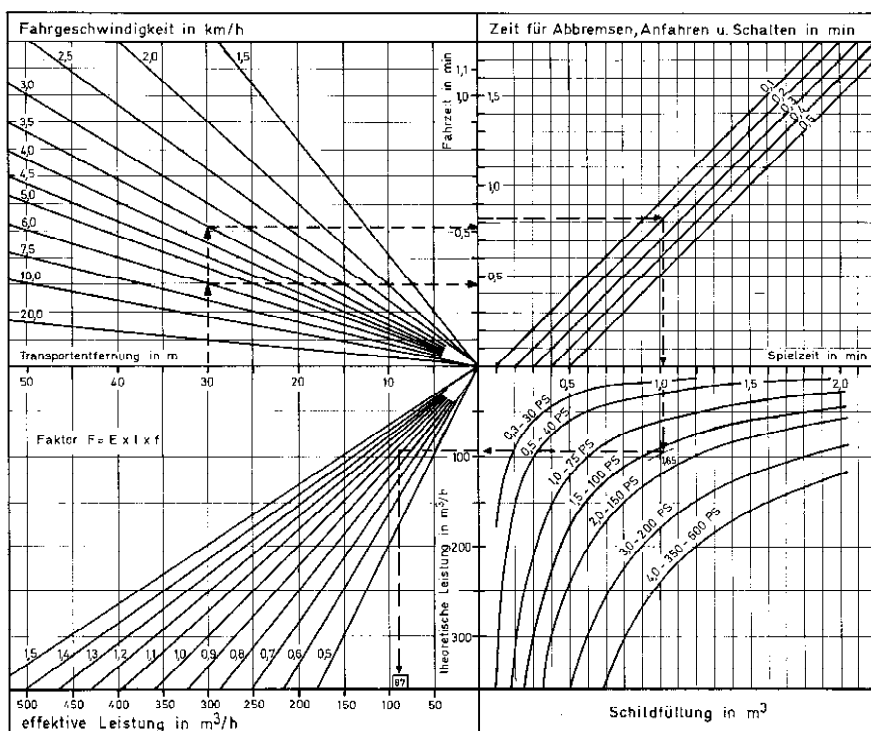


Bild 3-8: Leistungsdiagramm $\tilde{Q}_0$ (w ; v ; P ; V_{P100}) [lm^3/h] für Schubraupen im Entfernungsbereich bis 50 m [27]

Planiergeräte



Rippereinsatz von Planiertrauen mit Heckaufreisser

Nutzleistung Q_N [fm^3/h] von Planiertrauen mit Heckaufreisser

$$Q_N = Q_0 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

$$k_2 = f_1 \times f_4 \times f_5 \quad [-]$$

$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2 \quad [-]$$

Nutzleistung $\tilde{Q}_N$ [lm^3/h] von Planiertrauen mit Heckaufreisser

$$\tilde{Q}_N = Q_0 \times \frac{1}{\alpha} \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

Q_N	Nutzleistung	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
$\tilde{Q}_N$	Nutzleistung	$[\text{lm}^3/\text{h}]$
Q_0	maximale Grundreissleistung	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
α	Lösefaktor	$[\text{fm}^3/\text{lm}^3]$
f_1	Eindringtiefenverhältnis (praktische zu theoretischer Reisstiefe)	$[-]$
f_2, f_3	nicht massgebend	
f_4	Reisszahnzustandsfaktor	$[-]$
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	$[-]$
k_2	Leistungseinflussfaktor	$[-]$
k_3	Betriebsbeiwert	$[-]$
η_1	Bedienungsfaktor	$[-]$
η_2	Betriebsbedingungen	$[-]$
η_G	Geräteausnutzungsgrad	$[-]$
v	Reissgeschwindigkeit	$[\text{m}/\text{h}]$
b	theoretische Reissbreite bei einem Durchgang	$[\text{m}]$
d	theoretische Reisstiefe	$[\text{m}]$
b_P	praktische Reissbreite	$[\text{m}]$
d_P	praktische Reisstiefe	$[\text{m}]$

$$v = \frac{Q_N}{b_P \times d_P} \quad [\text{m}/\text{h}]$$

$$f_1 = \frac{b_P \times d_P}{b \times d} < 1 \quad [-]$$

Planiergeräte



Zum Reissen von klüftigem, bankigem Fels eignet sich der Einsatz von schweren Raupengeräten. Diese Geräte müssen ausreichend Eigengewicht und Zugkraft aufweisen, um die Reisskraft aufzubringen. Folgende Gesteine eignen sich besonders zum Rippren:

- stark geologisch vorfraktionierte Gesteine
- bankige Kalke
- Sandstein, Mergel, kalkige Mergel
- Schiefer

Seismische Wellengeschwindigkeit

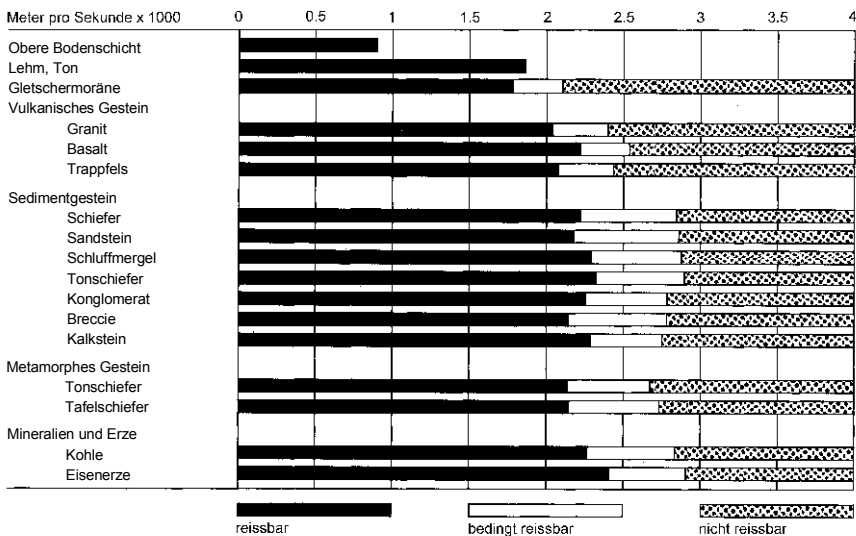
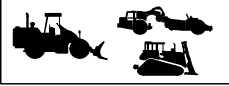


Bild 3-9: Klassifizierung der Reissbarkeit des Gesteins nach seismischer Wellengeschwindigkeit (Planierraupe mit 433 kW) [6]

Planiergeräte



Die Reissbarkeit des Gesteins wird meist durch die physikalische Grösse der seismischen Geschwindigkeit klassifiziert [6]. Allgemein kann man feststellen, dass die Grenze der wirtschaftlichen Abbaubarkeit durch die Rippertechnik bei 1500 – 1800 m/s liegt. Dabei sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Die Eindringtiefe des Reisszahns ist der Schlüssel zum Reisserfolg.
- Niedrige seismische Geschwindigkeiten deuten auf gute Reissbarkeit hin.
- Bei festem und hartem Material kann Vorsprengen die Reissbarkeit verbessern.

Das Rippren ist eine Kunst und keine exakte Wissenschaft. Daher ist exemplarisch die nachfolgend angegebene Leistungskurve für eine Liebherr PR 751 [6] mit 4.8 – 5.5 t und 240 kW gültig. Dieses Reissleistungsdiagramm gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Einzahnaufreisser
- 100 % Effektivität (60 min Reissen)
- seismische Geschwindigkeit ca. 1500 m/s, zwischen 1500 und 1800 m/s um 25 % abmindern
- ideal > stark geschiefertes Material
- erschwert > bankig

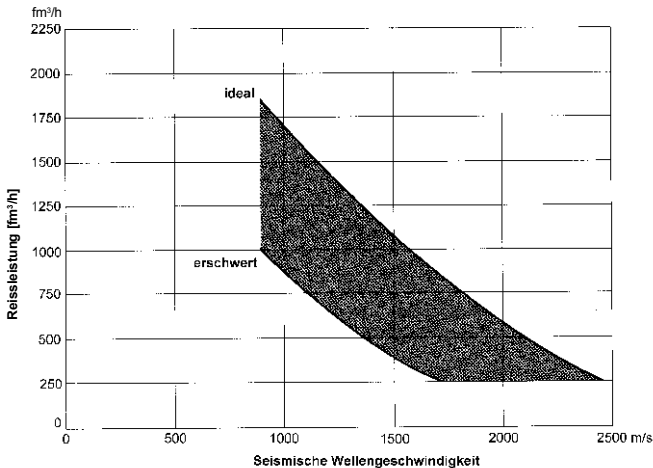
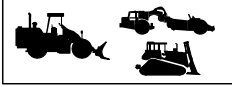


Bild 3-10: Grundreissleistung Q_0 [fm³/h] einer Raupe mit 240 kW Leistung [6]

Planiergeräte



Scraper (Flachbagger)

Nutz-/Dauerleistung Q_{SN} [fm³/h]

$$Q_{SN} = \frac{V_{SAE}}{t_U} \times 60 \times \prod_{i=1}^3 k_i \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Q_{SN}	Nutz-/Dauerleistung	[fm ³ /h]
V_{SAE}	Fördergefäßinhalt gemäss SAE	[m ³]
t_U	Umlaufzeit	[min]
k_i	Einflussfaktoren	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Ladefaktor k_1 [-]

$$k_1 = \alpha \times \varphi \quad [-]$$

α	Lösefaktor	[fm ³ /lm ³]
φ	Füllfaktor	[-]

Leistungseinflussfaktor k_2 [-]

$$k_2 = \prod_{i=1}^5 f_i \quad \text{mit } \Rightarrow (f_2; f_3) = 1 \wedge (f_1; f_4; f_5) \leq 1 \quad [-]$$

f_1	Schürftiefeinfluss	[-]
f_2	nicht massgebend	[-]
f_3	nicht massgebend	[-]
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]

Betriebsbeiwert k_3 [-]

$$k_3 = \prod_{i=1}^2 \eta_i \quad [-]$$

η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]

Planiergeräte

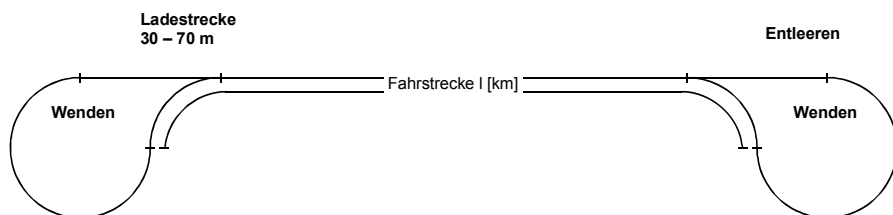


Bild 3-11: Fahrstrecke [3]

Umlaufzeit t_U [min]

$$t_U = t_L + t_E + 2 \times t_W + t_{H,voll} + t_{R,leer} \quad [\text{min}]$$

$$t_U = t_L + t_E + 2 \times t_W + \sum \frac{60 \times l_i}{1000 \times v_{voll,i}} + \sum \frac{60 \times l_i}{1000 \times v_{leer,i}} \quad [\text{min}]$$

t_U	Umlaufzeit	[min]
t_L	Beladezeit	[min]
t_E	Entleerungszeit	[min]
t_W	Wendezeit	[min]
$t_{H,voll}, t_{R,leer}$	Hinfahr-/Rückfahrzeit	[min]
l_i	Fahrstrecke i	[m]
$v_{voll,i}$	Fahrgeschwindigkeit unter Last (voll)	[km/h]
$v_{leer,i}$	Fahrgeschwindigkeit leer	[km/h]

Planiergeräte



Berechnungsalternative B

Nutz- bzw. Dauerleistung von Scrapern Q_{SN} [fm³/h] und Rad- und Raupenplaniergeräten Q_{PIN} [fm³/h]:

Scraper:	$Q_{SN} = \bar{V}_{S,0} \times \varphi_S \times \frac{\bar{Q}_{10}(w)}{10} \times k_2 \times k_S \times \eta_G$	[fm ³ /h]
Rad- u. Raupenplaniergeräte:	$Q_{PIN} = \bar{V}_{P,0} \times \varphi_P \times \bar{Q}_1(w) \times k_2 \times k_{P-i} \times \eta_G$	[fm ³ /h]
mit:	$\bar{V}_{S,0} = V_{S,0} \times \alpha$; $\bar{V}_{P,0} = 0.8 \times b \times h^2 \times \alpha$	

Q_{SN}	Nutz-/Dauerleistung Scraper	[fm ³ /h]
Q_{PIN}	Nutz-/Dauerleistung Rad- u. Raupenplaniergeräte	[fm ³ /h]
$\bar{Q}_{10}(w)$	Scraper-Einheitsgrundförderleistung (10 m ³ -Gefäss) in Abhängigkeit von der Förderweite w	[fm ³ /h]
$\bar{Q}_1(w)$	Rad-/Planiergerät-Einheitsgrundförderleistung (1 m ³ -Gefäss) in Abhängigkeit von der Förderweite w	[fm ³ /h]
$\bar{V}_{S,0}$	Scraper-Fördergefässinhalt, gestrichen voll	[fm ³]
$V_{S,0}$	Nenninhalt der Scrapermulde gemäss SAE	[lm ³]
$\bar{V}_{P,0}$	Planierschildinhalt	[fm ³]
k_S ; k_{P-i}	Betriebsbeiwert k_3	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
α	Lösefaktor	[fm ³ /lm ³]
φ_i	Gerätefüllungsgrad	[-]
s	Scraper	[-]
p	Planiergerät	[-]
i	Rad- bzw. Raupenplaniergerät	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Planiergeräte



Die Leistungslinien im nachstehenden Förderleistungsdiagramm sind aus Praxiserfahrungen mit folgenden Annahmen (für ideale Fördergefäßsinhalte von $\bar{V}_{S,0} = 10 \text{ fm}^3$ gestrichen voll bzw. $\bar{V}_{P,0} = 1 \text{ fm}^3$) zusammengestellt:

- Auflockerungsgrad $\delta_A = 1$ bzw. Lösefaktor $\alpha = 1$
- Gesamtabminderungsfaktor $k = 1$
- Gerätefüllungsgrad $\varphi = 1$

Leistungseinflussfaktor k_2 [-]

$k_2 = f_4 \times f_5$		[-]
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]

Betriebsbeiwert k_3 [-]

$k_3 = \prod_{j=1}^2 \eta_j = \eta_1 \times \eta_2 = k_S \text{ bzw. } k_{P-i}$		[-]
$i = [i \mid i = \text{Radgerät, } i = \text{Raupengerät}]$		
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]

Tabelle 3-5: Diverse Betriebsbeiwerte

Scraper	k_S	=	0.6 – 0.9	φ_S	=	0.7 – 1.1
Radplaniergeräte	$k_{P-\text{Rad}}$	=	0.45 – 0.8	φ_P	=	0.5 – 0.9
Raupenplaniergeräte	$k_{P-\text{Raup}}$	=	0.6 – 0.8			

Planiergeräte



Förderleistungsdiagramm für Scraper, Rad- und Raupenplaniergeräte

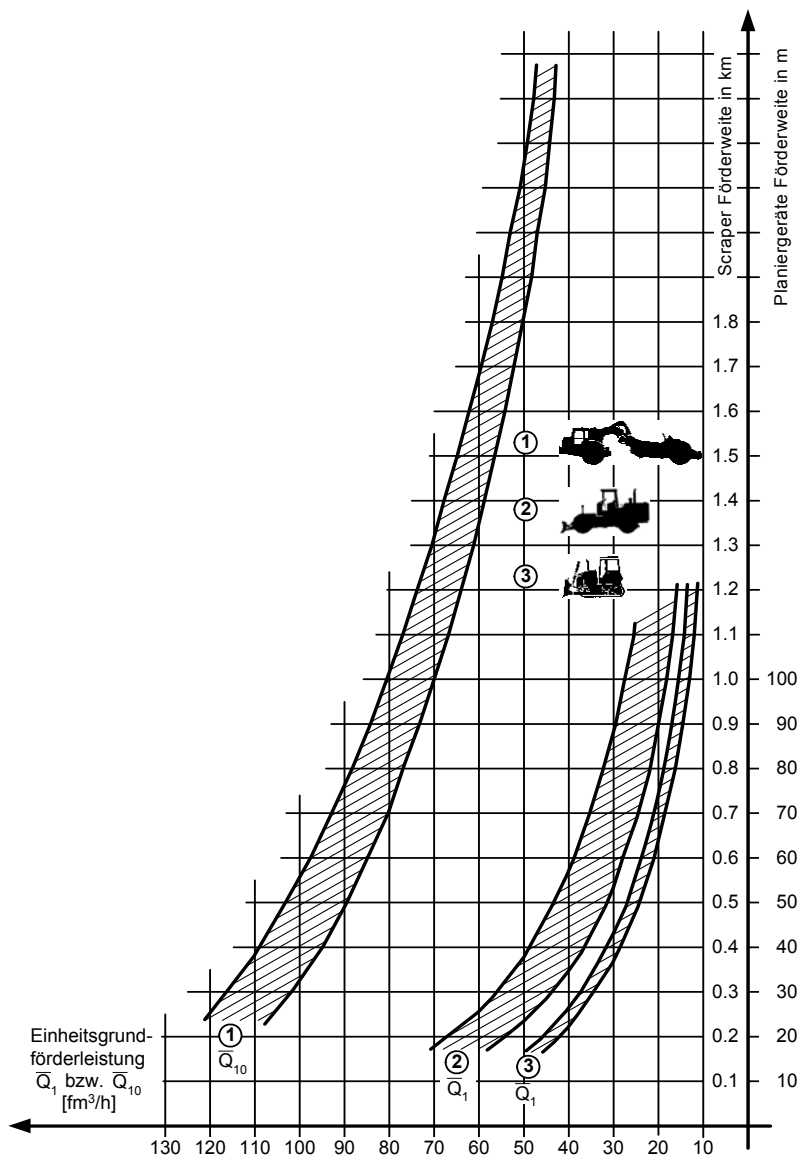


Bild 3-12: Förderleistungsdiagramm für Scraper, Rad- und Raupenplaniergeräte [3]

Planiergeräte



Grader

Die Arbeitsleistung eines Graders hängt stark von den Einsatzbedingungen ab:

Tabelle 3-6: Leistung eines Caterpillar Graders 140H mit 138 kW Leistung nach [7]

Art der Arbeit	Arbeitsleistung Q_N [m ² /h]
Feinplanieren auf Kippe	8'000
Schwerplanieren	18'000
Instandhalten von Baustrassen	30'000
Instandhalten von Erd- und Förderwegen	30'000
Böschungsarbeiten	6'000
Anlegen/Räumen von Gräben	9'000
Aufreissen	5'000
Verteilen von Schüttgut	12'000
Schneeräumung	50'000

Verdichtungsgeräte



3.5 Verdichtungsgeräte

Nutzleistung Q_N [vm^3/h] eines Verdichtungsgeräts

$Q_N = \frac{v \times b \times d}{n} \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[vm^3/h]
$k_1 = 1$	[-]
$k_2 = f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]

Q_N	Nutzleistung (bezogen auf verdichteten Zustand)	[vm^3/h]
v	Geschwindigkeit des Geräts	[m/h]
b	wirksame Breite	[m]
d	Schütthöhe, verdichtet	[m]
n	Zahl der Übergänge	[-]
k_1	nicht massgebend	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
$f_1; f_2; f_3; f_4$	nicht massgebend	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Die **Höhe des verdichteten Bodens d [m]** ergibt sich aus folgender Beziehung:

$d = \tilde{d} \times \delta_v$		[m]
$\tilde{d}$	Schütthöhe, unverdichtet	[m]
δ_v	Verdichtungsfaktor < 1	[vm^3/lm^3]

Unter Verdichtung versteht man die bleibende Verminderung des Porenanteils bzw. die bleibende Erhöhung der Trockendichte eines Bodens. Bei nichtbindigen Böden besitzen der Ungleichförmigkeitsgrad und die Kornrauigkeit den grössten Einfluss auf die Verdichtbarkeit. Die Verdichtung gemischtkörniger Böden mit höherem Feinanteil hängt in erster Linie vom Wassergehalt und dem Sättigungsgrad ab [28].

Verdichtungsgeräte



In Tabelle 3-7 sind Anhaltswerte für den Verdichtungsfaktor δ_v dargestellt. Bei der Anwendung dieser Werte ist zu berücksichtigen, dass es sich um Näherungswerte handelt, die lediglich einer überschlägigen Berechnung dienen können. Für eine genaue Leistungsberechnung der Bodenverdichtung ist die genaue Kenntnis der Bodenzusammensetzung und der wichtigsten Parameter wie z.B. Trockenrohdichte, Wassergehalt und Verdichtungslinie unerlässlich.

Tabelle 3-7: Anhaltswerte für den Verdichtungsfaktor δ_v nach [29]

Boden- und Fels- klasse nach DIN 18300		Boden	Verdichtungs- faktor δ_v [m^3/m^3] Mittelwert	Verdichtungsfaktor δ_v [m^3/m^3] Bandbreite			
				0.6			1.0
1	Oberboden	—	—				
2	Fliessende Böden	—	—				
3	Leicht lösbare Böden	Kies Kiessand	0.82 0.73				
4/5	Mittelschwer lösbare Böden	Ton Lehm / Sand	0.77 0.72				
6	Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten	Ton-, Mergelstein	0.85				
7	Schwer lösbarer Fels	Kalk-, Sandstein / Granit	0.83				

Die Eignung der Verdichtungsgeräte ist je nach Baustellenart und -bedingungen sehr verschieden. Die Tabellen 3-8 bis 3-12 geben einen Überblick.

Verdichtungsgeräte



Geräteart		Baustellenbedingungen			
		Damm und Einschnitt	Bauwerks-hinterfüllung	Leitungs-gräben	
Arbeitsfläche					
eng	frei				
		E	E	E	E
statisch					
Glattmantelwalze		+	+		
Schaffuswalze		+	++		
Gummiradwalze		selbstfahrend	++		
		gezogen	++		
Gürtelradwalze		++	++		
Gitterradwalze		+	++		
dynamisch					
Fallplatte		++	+		
Explosionsstamper		++	+	+	+
Schnellschlagstamper		+		++	++
Anhängenvibrationswalze		leicht < 50 kN	++		
		mittel	++		
		schwer > 80 kN	++		
Doppelvibrationswalze		leicht < 25 kN	++	+	+
		schwer > 25 kN	++	+	
Vibrationstamperwalze		leicht < 50 kN	++	+	
		schwer > 50 kN	++	++	
Vibrationsschaffuswalze			+	++	
Rüttelplatten		leicht < 25 kN	++	+	++
		schwer > 25 kN	++	+	+

Legende:

E Eignung
++ empfohlen
+ meist geeignet

Tabelle 3-8: Einsatzmöglichkeit von Verdichtungsgeräten nach [28]

Verdichtungsgeräte



- Geschwindigkeit v [m/h]

Arbeitsgeschwindigkeit nach Herstellerangaben, im Allgemeinen beträgt sie zwischen 2000 und 6000 m/h [7].

- Wirksame Breite b [m]

Die wirksame Breite des Verdichtungsgeräts entspricht höchstens der 0.8fachen Breite der effektiven Grösse. Zum Berechnen der effektiven Breite muss die Breite der Einbaubahn im Verhältnis zur Rollbreite berücksichtigt werden [7].

Beispiel: Eine Vibrationswalze mit einer Walzkörperbreite von 1.98 m benötigt 2 Rollbreiten, um eine 3.6 m breite Spur zu verdichten. Die wirksame Breite beträgt also 1.8 m. Eine Walze mit 1.4 m Walzkörperbreite muss 3 Übergänge durchführen, um die 3.6 m breite Spur zu verdichten. Ihre wirksame Breite beträgt daher 1.2 m.

- Schütthöhe $\tilde{d}$ [m]
siehe Tabellen 3-9 bis 3-12.
- Zahl der Übergänge n [-]
siehe Tabellen 3-9 bis 3-12.

Verdichtungsgeräte



		Lockergestein		
		grobkörnig, nicht bindig		
Geräteart		E	$\tilde{d}$ [cm]	n [-]
statisch				
Glattmantelwalze		+	10 – 20	4 – 8
Schaffusswalze				
Gummiradwalze	selbstfahrend	++	20 – 30	6 – 10
	gezogen	++	30 – 50	6 – 10
Gürtelradwalze				
Gitterradwalze				
dynamisch				
Fallplatte				
Explosionsstampfer		+	20 – 50	3 – 5
Schnellschlagstampfer		+	20 – 40	2 – 4
Anhängevibrationswalze	leicht < 50 kN	++	30 – 50	3 – 5
	mittel	++	40 – 60	3 – 5
	schwer > 80 kN	++	50 – 80	3 – 5
Doppelvibrationswalze	leicht < 25 kN	++	20 – 40	4 – 6
	schwer > 25 kN	++	30 – 50	4 – 6
Vibrationstandemwalze	leicht < 50 kN	++	20 – 40	4 – 6
	schwer > 50 kN	++	30 – 50	4 – 6
Vibrationsschaffusswalze		+	30 – 50	3 – 5
Rüttelplatten	leicht < 25 kN	++	20 – 40	5 – 8
	schwer > 25 kN	++	30 – 60	4 – 6

Legende:	E	Eignung		
	$\tilde{d}$	Schütthöhe	++	empfohlen
	n	Anz. Übergänge	+	meist geeignet

Tabelle 3-9: Eignung von Verdichtungsmitteln in grobkörnigem, nicht bindigem Lockergestein nach [28]

Verdichtungsgeräte



		Lockergestein		
		feinkörnig (bindig), bindige Sande		
Geräteart		E	$\tilde{d}$ [cm]	n [-]
statisch				
Glattmantelwalze		+	10 – 20	4 – 8
Schaffusswalze		++	20 – 30	8 – 12
Gummiradwalze	sebstfahrend	++	20 – 30	6 – 10
	gezogen	++	30 – 50	6 – 10
Gürtelradwalze		++	20 – 30	6 – 8
Gitterradwalze		+	20 – 30	6 – 10
dynamisch				
Fallplatte		+	50 – 70	4
Explosionsstampfer		++	20 – 40	3 – 5
Schnellschlagstampfer		+	10 – 20	2 – 4
Anhängervibrationswalze	leicht < 50 kN	+	20 – 30	3 – 4
	mittel			
	schwer > 80 kN			
Doppelvibrationswalze	leicht < 25 kN	+	10 – 20	5 – 8
	schwer > 25 kN	+	10 – 30	5 – 8
Vibrationst tandemwalze	leicht < 50 kN	++	20 – 40	6 – 10
	schwer > 50 kN			
Vibrationsschaffusswalze				
Rüttelplatten	leicht < 25 kN	++	20 – 40	6 – 10
	schwer > 25 kN			

Legende:	E	Eignung		
	$\tilde{d}$	Schütthöhe	++	empfohlen
	n	Anz. Übergänge	+	meist geeignet

Tabelle 3-10: Eignung von Verdichtungsmitteln in feinkörnigem, bindigem Lockergestein nach [28]

Verdichtungsgeräte



		Lockergestein		
		gemischtkörnig (bindig, schwach steinig)		
Geräteart		E	$\tilde{d}$ [cm]	n [-]
statisch				
Glattmantelwalze		+	10 – 20	4 – 8
Schaffusswalze		+	20 – 30	8 – 12
Gummiradwalze	selbstfahrend	+	20 – 30	6 – 10
	gezogen	++	30 – 40	6 – 10
Gürtelradwalze		++	20 – 30	6 – 8
Giterradwalze		++	20 – 30	6 – 10
dynamisch				
Fallplatte		++	50 – 70	4
Explosionsstampfer		+	20 – 50	3 – 5
Schnellschlagstampfer		+	20 – 30	2 – 4
Anhängevibrationswalze	leicht < 50 kN	+	20 – 40	3 – 5
	mittel	++	30 – 50	3 – 5
	schwer > 80 kN	++	40 – 60	3 – 5
Doppelvibrationswalze	leicht < 25 kN	+	20 – 30	5 – 8
	schwer > 25 kN	++	20 – 40	5 – 8
Vibrationstandemwalze	leicht < 50 kN			
	schwer > 50 kN	+	20 – 40	5 – 8
Vibrationsschaffusswalze		++	20 – 40	6 – 10
Rüttelplatten	leicht < 25 kN	+	10 – 20	5 – 8
	schwer > 25 kN	+	20 – 40	4 – 6
Legende:		E	Eignung	
		$\tilde{d}$	Schütthöhe	++ empfohlen
		n	Anz. Übergänge	+ meist geeignet

Tabelle 3-11: Eignung von Verdichtungsmitteln in gemischtkörnigem, bindigem Lockergestein nach [28]

Verdichtungsgeräte



		Fels		
		Steine und Blöcke bis 400 mm, nicht bindig		
Geräteart		E	$\tilde{d}$ [cm]	n [-]
statisch				
Glattmantelwalze		+	20 – 30	8 – 12
Schaffussswalze				
Gummiradwalze	selbstfahrend gezogen			
Gürtelradwalze				
Gitterradwalze		+	30 – 40	8 – 12
dynamisch				
Fallplatte		++	50 – 80	4
Explosionsstampfer		+	30 – 50	3 – 5
Schnellschlagstampfer				
Anhängevibrationswalze	leicht < 50 kN			
	mittel	+	40 – 60	4 – 6
	schwer > 80 kN	++	50 – 100	4 – 6
Doppelvibrationswalze	leicht < 25 kN			
	schwer > 25 kN	+	30 – 50	5 – 8
Vibrationstandemwalze	leicht < 50 kN			
	schwer > 50 kN			
Vibrationsschaffussswalze		++	30 – 50	6 – 10
Rüttelplatten	leicht < 25 kN			
	schwer > 25 kN	+	30 – 50	4 – 6

Legende:	E	Eignung		
	$\tilde{d}$	Schütthöhe	++	empfohlen
	n	Anz. Übergänge	+	meist geeignet

Tabelle 3-12: Eignung von Verdichtungsmitteln in nicht bindigem Fels nach [28]

4 Transportgeräte

Lastkraftwagen, Schwerlastkraftwagen, Dumper

Gleisförderung

Bandförderung

Flüssigkeitsförderung

Schneckenförderung

LKW, SKW, Dumper



4.1 LKW, SKW, Dumper

Nutzleistung Q_N [fm^3/h] eines Einzelfahrzeugs

$Q_N = \frac{V_{\text{FSAE}}}{t_U} \times 60 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[fm^3/h]
$k_1 = \alpha \times \varphi$	[-]
$k_2 = f_3 \times f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]
Q_N	Nutzleistung des Einzelfahrzeugs [fm^3/h]
V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE [m^3]
	$V_{\text{FSAE},1}$ für Benutzung von öffentlichen Strassen
	$V_{\text{FSAE},2}$ für reinen Baustellenverkehr
t_U	Umlaufzeit [min]
α	Lösefaktor [fm^3/lm^3]
φ	Füllfaktor [-]
η_1	Bedienungsfaktor [-]
η_2	Betriebsbedingungen [-]
$f_1; f_2$	nicht massgebend
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor [-]
	Kippe = 1; Bahnwaggon = 0.8
f_4	nicht massgebend
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor [-]
k_1	Ladefaktor [-]
k_2	Leistungseinflussfaktor [-]
k_3	Betriebsbeiwert [-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad [-]

LKW, SKW, Dumper



Kontrolle: Muldeninhalt des Fahrzeugs V_{FSAE} [m^3]

Das maximal mögliche bzw. zulässige Ladevolumen darf die zulässige Nutzlast nicht überschreiten:

$$V_{\text{FSAE}} \times \varphi \leq \frac{G_N}{\rho_S} \quad [\text{m}^3]$$

V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE	$[\text{m}^3]$
φ	Füllfaktor	$[-]$
ρ_S	Schüttdichte	$[\text{t}/\text{m}^3]$
G_N	zulässige Nutzlast	$[\text{t}]$

Theoretische Umlaufzeit t_U [min]

Die theoretische Umlaufzeit eines Transportgeräts setzt sich zusammen aus der Beladezeit t_L , der Fahrzeit voll t_{FV} , der Entladezeit t_E , der Fahrzeit leer t_{FI} und der Wartezeit t_W beim Füllen bzw. der Wagenwechselzeit t_{WZ} am Ladegerät [5], [14].

$$t_U = t_L + t_{FV} + t_E + t_{FI} + t_W + t_{WZ} \quad [\text{min}]$$

t_U	Umlaufzeit des Fahrzeugs (theoretisch/ kurzzeitig)	[min]
t_L	Beladezeit (theoretisch/ kurzzeitig)	[min]
t_{FV}	Fahrzeit voll	[min]
t_E	Entladezeit	[min]
t_{FI}	Fahrzeit leer	[min]
t_W	Wartezeiten beim Be- und Entladen	[min]
t_{WZ}	Wagenwechselzeit	[min]

LKW, SKW, Dumper



Theoretische Beladezeit t_L [min]

Zur Bestimmung der theoretischen **Beladezeit t_L [min]** gilt allgemein:

$$t_L = \frac{V_{FSAE} \times \varphi_T}{V_{SAE} \times \varphi_L} \times \frac{t_S}{60} \quad [\text{min}]$$

t_L	Beladezeit (theoretisch/ kurzzeitig)	[min]
V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE	[m ³]
φ_T	Füllfaktor Transportgerät	[-]
V_{SAE}	Nenninhalt des Grabgefässes gemäss SAE	[m ³]
φ_L	Füllfaktor Ladegerät	[-]
t_S	Spielzeit des Ladegeräts	[s]

In dieser Formel zur Berechnung der theoretischen Beladezeit ist jedoch nicht berücksichtigt, dass das Ladegerät während der Wagenwechselzeit die Zeit für einen weiteren Grabvorgang nutzen und dass das gefüllte Grabgefäss geleert werden kann, sobald das leere Fahrzeug bereitsteht. Somit ist bei der Berechnung der theoretischen Beladezeit eine Spielzeit weniger einzusetzen ($t_{WZ} \approx t_S$).

$$t_L = \left(\frac{V_{FSAE} \times \varphi_T}{V_{SAE} \times \varphi_L} - 1 \right) \times \frac{t_S}{60} = (m - 1) \times \frac{t_S}{60} \quad [\text{min}]$$

m	Anzahl Schaufelfüllungen pro Fahrzeug	[-]
-----	---------------------------------------	-----

Fahrzeit voll t_{FV} / Fahrzeit leer t_{FI} [min]

Bei der Berechnung der Fahrzeiten der Transportgeräte unterscheidet man zwischen den normalen LKW, die auch für den Strassenverkehr zugelassen sind, und den Dumpfern sowie den sogenannten SKW (Schwerlastkraftwagen) mit meist wesentlich höherem Gesamtgewicht, die nur im nichtöffentlichen Baustellenbereich eingesetzt werden dürfen.

LKW, SKW, Dumper



Die Strecke vom Belade- zum Entladeort muss in Teilstrecken mit verschiedenen Fahrbedingungen unterteilt werden.

$$t_F = t_{Fv} + t_{Fl} = \sum \frac{60 \times l_{i,v}}{1000 \times v_{i,v}} + \sum \frac{60 \times l_{i,l}}{1000 \times v_{i,l}} \quad [\text{min}]$$

t_F	Fahrzeit	[min]
t_{Fv}	Fahrzeit voll	[min]
t_{Fl}	Fahrzeit leer	[min]
$l_{i,v}$	Teilstrecke i bei vollem Transportfahrzeug	[m]
$l_{i,l}$	Teilstrecke i bei leerem Transportfahrzeug	[m]
$v_{i,v}$	Durchschnittsgeschwindigkeit des vollen Transportfahrzeugs auf der Teilstrecke i	[km/h]
$v_{i,l}$	Durchschnittsgeschwindigkeit des leeren Transportfahrzeugs auf der Teilstrecke i	[km/h]

Lastkraftwagen LKW

Bei den Lastkraftwagen können folgende Durchschnittsgeschwindigkeiten v_i angenommen werden:

Tabelle 4-1: Durchschnittsgeschwindigkeiten v_i [km/h] für LKW auf verschiedenen Untergründen

Untergrund	v_i [km/h]
Auf Humusböden im Feld und Aushub	5
Auf nicht befestigten Transportpisten und auf der Deponie	10 – 15
Auf befestigten Transportpisten	15 – 30
Auf öffentlichen Strassen (abhängig von Verkehrsaufkommen, Ortschaften, Überland usw.)	40 – 60

Bei Lastkraftwagen findet bei der Anwendung der Durchschnittsgeschwindigkeit keine Unterscheidung zwischen leerem und beladenem Zustand statt.

LKW, SKW, Dumper



Schwerlastkraftwagen SKW

Schwerlastkraftwagen sind zur optimalen Ausnutzung der Motorleistung mit Drehmomentwandlern ausgerüstet. Die Umwandlung des Drehmoments erfolgt gemäss der jeweiligen Belastung. Der Motor läuft somit immer im günstigsten Leistungsbereich, da der Drehmomentwandler den Kraftbedarf selbsttätig steuert.

Mittels Nomogrammen aus den Herstellerprospekten [7] kann die maximale Fahrgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Diagramme verlangen jedoch als Inputdaten die Steigung, den Rollwiderstand, die Länge der Fahrstrecke und den Fahrzeugtyp.

Der Rollwiderstandsbeiwert w_R (Tabelle 8-13) resultiert aus der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Er wird zur Steigung addiert, und mittels des Bruttogewichts (beladen oder leer) des Schwerlastkraftwagens wird die Felgenzugkraft ermittelt. Somit kann aus der Zugkraftkurve die maximale Geschwindigkeit herausgelesen werden. Da sich jedoch beim Anfahren und Bremsen die Geschwindigkeit reduziert, muss ein Geschwindigkeitskorrekturfaktor k_G [-] berücksichtigt werden.

Durchschnittsgeschwindigkeit v_i [km/h] des leeren/vollen SKW

$$v_i = v_{i,max} \times k_G \quad [\text{km/h}]$$

v_i	Durchschnittsgeschwindigkeit des leeren/vollen SKW	[km/h]
$v_{i,max}$	Maximale Geschwindigkeit des leeren/vollen Transportfahrzeugs (z.B. [7])	[km/h]
k_G	Geschwindigkeitskorrekturfaktor (Tabelle 4-2)	[-]

Tabelle 4-2: Geschwindigkeitskorrekturfaktor k_G [5]

Streckenabschnittslänge l_i [m]	Geschwindigkeitskorrekturfaktor k_G [-]	
	stehender Start	fliegender Start
0 – 100	0.20 – 0.50	0.50
100 – 250	0.30 – 0.60	0.60 – 0.75
250 – 500	0.50 – 0.65	0.70 – 0.80
500 – 800	0.60 – 0.70	0.75 – 0.80
800 – 1200	0.65 – 0.75	0.80 – 0.85
1200 und mehr	0.70 – 0.85	0.80 – 0.90

LKW, SKW, Dumper



Entladezeit t_E [min]

Bodenschütter	0.3
Hinterkipper	1.0

Wagenwechselzeit t_{WZ} [min]

Vorstossen, Kreisverkehr	0
Rückstossen	0.4 – 0.6

Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge n [-]

Die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge lässt sich aus der Umlaufzeit t_U des Fahrzeugs, der Wagenfolgezeit t_f und dem Ladevolumen V_{FSAE} der LKW/SKW bestimmen. Zur Bestimmung der passenden Umlaufzeit ist die Betrachtung der möglichen Transportketten, die im Folgenden erläutert sind, erforderlich.

Theoretische Wagenfolgezeit t_f [min]

Die theoretische Wagenfolgezeit ist die Verweilzeit des Fahrzeugs am Beladeort. Sie beinhaltet die Beladezeit und die Wagenwechselzeit (zeitlicher Abstand der Transportfahrzeuge am Ladegerät).

$t_f = t_L + t_{WZ} = (m - 1) \times \frac{t_S}{60} + t_{WZ}$				[min]
t_f	Wagenfolgezeit	(theoretisch/ kurzzeitig)		[min]
t_L	Beladezeit	(theoretisch/ kurzzeitig)		[min]
t_{WZ}	Wagenwechselzeit			[min]
m	Anzahl Schaufelfüllungen pro Fahrzeug			[-]
t_S	Spielzeit des Ladegeräts			[s]

LKW, SKW, Dumper



Transportketten im Erdbau

Fall 1: Beim Kreisverkehr mit $t_{WZ} \leq t_s$ gilt:

$$t_f = \frac{m \times t_s}{60} \quad [\text{min}]$$

Fall 2: Beim Rückstossverkehr mit $t_{WZ} > t_s$ gilt:

$$t_f = \frac{m \times t_s}{60} + \Delta t \quad [\text{min}]$$

$$\Delta t = \frac{-t_s}{60} + t_{WZ} \sim 0.5 - 1.0 \text{ min} \quad [\text{min}]$$

somit gilt für die theoretische Wagenfolgezeit t_f :

$$t_f = \left\{ t_f \mid t_f = \frac{m \times t_s}{60} \Rightarrow t_{WZ} \leq \frac{t_s}{60} \vee t_f = \frac{m \times t_s}{60} + \Delta t \Rightarrow t_{WZ} > \frac{t_s}{60} \right\} \quad [\text{min}]$$

Δt Differenz aus Wagenwechselzeit t_{WZ} und Spielzeit t_s [min]
 $\Delta t = t_{WZ} - t_s/60$ mit $t_{WZ} > t_s$

Theoretische Gesamtnutzleistung $Q_{T\text{Neff}}$ [fm^3/h] der Transportkette

$$Q_{T\text{Neff}} = \frac{V_{\text{FSAE}}}{t_f} \times 60 \times \prod_{i=1}^3 k_i \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Transportfahrzeugleistung bei einer Fahrzeugfolgezeit t_f mit n eingesetzten Transportfahrzeugen pro Ladegerät

Anzahl der Fahrten aller Transportfahrzeuge n_{Fahrten} [-]

$$n_{\text{Fahrten}} = \frac{V}{V_{\text{FSAE}} \times \alpha \times \varphi} \quad [-]$$

n_{Fahrten}	Anzahl der Fahrten aller Transportfahrzeuge	[-]
V	Gesamtaushubvolumen	[fm^3]
V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE	[m^3]
α	Lösefaktor	[fm^3/lm^3]
φ	Füllfaktor	[-]

LKW, SKW, Dumper



Transportketten im Erdbau – Nutzleistung (Langzeitleistung)

Totaler Leistungsreduktionskoeffizient (Langzeitleistung):

$$\eta_{\text{Total}}^L = (k_2 \times k_3 \times \eta_G)_L$$

$$\eta_{\text{Total}}^T = (k_2 \times k_3 \times \eta_G)_T$$

η_{Total}^L	Totaler Leistungsreduktionskoeffizient Ladegerät	[-]
η_{Total}^T	Totaler Leistungsreduktionskoeffizient Transportgerät	[-]
$k_{2,L}$	Leistungseinflussfaktor Ladegerät	[-]
$k_{3,L}$	Betriebsbeiwert Ladegerät	[-]
$\eta_{G,L}$	Geräteausnutzungsgrad Ladegerät	[-]
$k_{2,T}$	Leistungseinflussfaktor Transportgerät	[-]
$k_{3,T}$	Betriebsbeiwert Transportgerät	[-]
$\eta_{G,T}$	Geräteausnutzungsgrad Transportgerät	[-]
L	Ladegerät	[-]
T	Transportgerät	[-]

Nutzbare Fahrzeugladezeit $t_{L,N}$ und Fahrzeugfolgezeit $t_{f,N}$ [min]

Fall 1: $t_{WZ} \leq t_s$, Kreisverkehr

$$t_{L,N} = \left(\frac{V_{\text{FSAE}} \times \varphi_T}{V_{\text{SAE}} \times \varphi_L} - 1 \right) \times \frac{t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{\text{Total}}^L} = (m - 1) \times \frac{t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{\text{Total}}^L} \quad [\text{min}]$$

$$t_{f,N} = \left(\frac{m \times t_s}{60} - \frac{t_s}{60} \right) \times \frac{1}{\eta_{\text{Total}}^L} + t_{WZ} \quad [\text{min}]$$

$$\Delta t_N = \frac{-t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{\text{Total}}^L} + t_{WZ} \approx 0 \quad [\text{min}]$$

Daraus folgt:

$$t_{f,N} = \frac{m \times t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{\text{Total}}^L} \quad [\text{min}]$$

LKW, SKW, Dumper



$t_{L,N}$	Beladezeit	(Langzeitleistung)	[min]
V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE		[m ³]
φ_T	Füllfaktor Transportgerät		[-]
V_{SAE}	Nenninhalt des Grabgefässes gemäss SAE		[m ³]
φ_L	Füllfaktor Ladegerät		[-]
m	Anzahl Schaufelfüllungen pro Fahrzeug		[-]
$t_{f,N}$	Wagenfolgezeit	(Langzeitleistung)	[min]
t_s	Spielzeit des Ladegeräts		[s]
t_{WZ}	Wagenwechselzeit	(Langzeitleistung)	[min]
Δt_N	Differenz aus Wagenwechselzeit t_{WZ} und Spielzeit t_s	(Langzeitleistung)	[min]

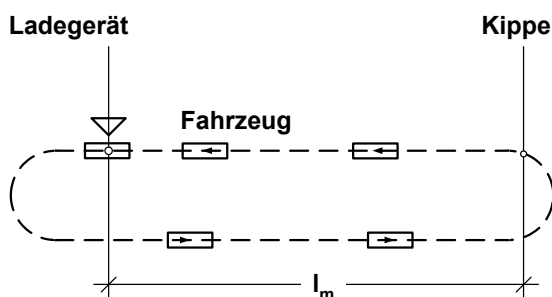


Bild 4-1: Idealfall einer Transportkette – Kreisverkehr [5]

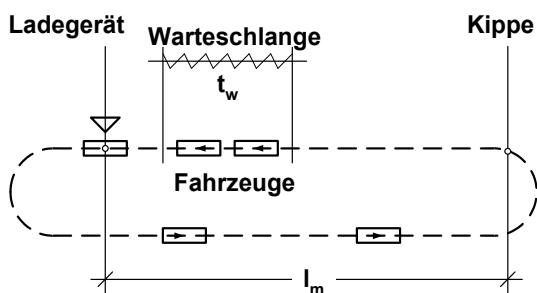


Bild 4-2: Realfall instationärer Zustand mit Warteschlange – Kreisverkehr [5]

LKW, SKW, Dumper



Fall 2: $t_{wz} > t_s$, Rückstossverkehr

$$t_{L,N} = \frac{(m-1) \times t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} \quad [\text{min}]$$

$$t_{f,N} = \left(\frac{m \times t_s - t_s}{60} \right) \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} + t_{wz} \quad [\text{min}]$$

$$\Delta t_N = \frac{-t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} + t_{wz} \quad [\text{min}]$$

Daraus folgt

$$t_{f,N} = \frac{m \times t_s}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} + \Delta t \quad [\text{min}]$$

$$\Delta t = 0.5 - 1 \text{ min}$$

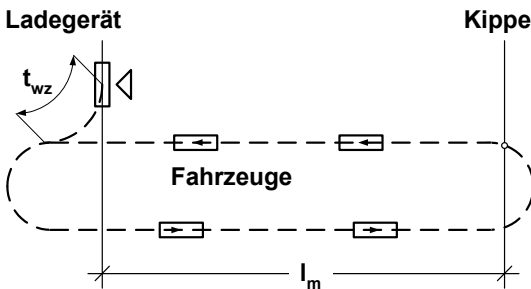


Bild 4-3: Idealfall einer Transportkette – Rückstossverkehr

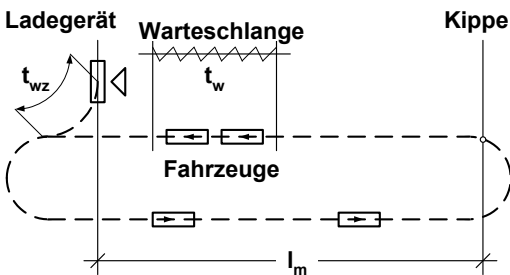


Bild 4-4: Realfall instationärer Zustand mit Warteschlange – Rückstossverkehr

LKW, SKW, Dumper



Zusammengefasst gilt (alle Zeiten vereinheitlicht, z.B. auf Minuten):

$$t_{f,N} = \left\{ \begin{array}{l} t_{f,N} = \frac{m \times t_S}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} \Rightarrow t_{WZ} \leq \frac{t_S}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} \\ t_{f,N} = \frac{m \times t_S}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} + \Delta t \Rightarrow t_{WZ} > \frac{t_S}{60} \times \frac{1}{\eta_{Total}^L} \end{array} \right\} \quad [\text{min}]$$

Damit eine optimale Abstimmung und Auslastung zwischen Lade- und Transportfahrzeug erreicht wird, sollte die Fahrzeugwechselzeit

$$t_{WZ} \leq t_S / 60 \times \frac{1}{\eta_{Total}^L}$$

sein. Die Wartezeit t_W sollte möglichst gegen null gehen, ist aber praktisch nicht vermeidbar. Die Wartezeit geht in die Umlaufzeit der einzelnen Fahrzeuge ein.

Umlaufzeit $t_{U,N}$ [min]

$$t_{U,N} = \frac{t_L}{\eta_{Total}^L} + (t_W + t_{WZ} + \frac{60}{1000} \times \sum_i \left(\frac{l_i}{v_{voll_i}} + \frac{l_i}{v_{leer_i}} \right) + t_E) \times \frac{1}{\eta_{Total}^T} \quad [\text{min}]$$

Wird (t_W) = 0, so gilt:

$$t_{U,N} = \frac{t_f}{\eta_{Total}^L} + (\frac{60}{1000} \times \sum_i \left(\frac{l_i}{v_{voll_i}} + \frac{l_i}{v_{leer_i}} \right) + t_E) \times \frac{1}{\eta_{Total}^T} \quad [\text{min}]$$

$t_{U,N}$	Umlaufzeit des Fahrzeugs	(Langzeitleistung)	[min]
t_f	Wagenfolgezeit	(theoretisch)	[min]
v_{ji}	Geschwindigkeit mit $j = \{j \mid j = \text{voll}; j = \text{leer}\}$ im		[km/h]
	Streckenabschnitt i		
l_i	Streckenabschnitt i		[m]
t_E	Entladezeit	(theoretisch)	[min]

LKW, SKW, Dumper



Mindestanzahl der Transportfahrzeuge n [-] pro Ladegerät

Für die Berechnung der Mindestanzahl der Transportfahrzeuge pro Ladegerät bieten sich zwei Berechnungsmethoden an. Methode 1 setzt die effektiven Leistungen ins Verhältnis, Methode 2 setzt die Umlaufzeit zur Wagenfolgezeit ins Verhältnis.

Methode 1: Mindestanzahl Transportgeräte für Langzeitleistung:

$$n = \frac{Q_{L,N}}{Q_{T,N}} \quad [-]$$

n	Anzahl der erforderlichen Transportgeräte	[-]
$Q_{L,N}$	Nutzleistung Ladegerät (Langzeitleistung)	[fm^3/h]
$Q_{T,N}$	Nutzleistung Transportgerät (Langzeitleistung)	[fm^3/h]
L	Ladegerät	[-]
T	Transportgerät	[-]

Methode 2: Mindestanzahl Transportgeräte für Langzeitleistung:

Anzahl der Ladeschaufeln pro Transportgerät:

$$m = \frac{V_{\text{FSAE},2}^T \times \varphi_{T,2}}{V_{\text{SAE}}^L \times \varphi_L} \vee \frac{V_{\text{FSAE},1}^T \times \varphi_{T,1}}{V_{\text{SAE}}^L \times \varphi_L} \quad [-]$$

m	Anzahl der Ladeschaufeln pro Transportgerät	[-]
$\varphi_{T,1}$	Füllfaktor Strasse	[-]
$\varphi_{T,2}$	Füllfaktor Baustelle	[-]

Reale durchschnittliche Fahrzeugfolgezeit bzw. Ladezeit pro Transportgerät (Langzeitleistung):

$$t_{f,N} = \left\{ \begin{array}{l} t_{f,N} = \frac{t_f}{\eta_{\text{Total}}} = m \times t_{S,N} = m \times \frac{t_s}{\eta_{\text{Total}}} = m \times \frac{t_s}{(k_2 \times k_3 \times \eta_G)_L} \\ \vee \\ t_{f,N} = m \times \frac{t_s}{\eta_{\text{Total}}} + \frac{\Delta t}{\eta_{\text{Total}}} = m \times \frac{t_s}{(k_2 \times k_3 \times \eta_G)_L} + \frac{\Delta t}{(k_2 \times k_3 \times \eta_G)_T} \end{array} \right\} \quad [\text{min}]$$

LKW, SKW, Dumper



Reale durchschnittliche Umlaufzeit (Langzeitleistung):

$$t_{U,N} = \frac{t_f}{\eta_{Total}^L} + (t_{FV} + t_E + t_{FL} + t_{WZ}) \frac{1}{\eta_{Total}^T} \quad [\text{min}]$$

η_{Total}^L	Totaler Leistungsreduktionskoeffizient Ladegerät	[-]
η_{Total}^T	Totaler Leistungsreduktionskoeffizient Transportgerät	[-]
$k_{2,L}$	Leistungseinflussfaktor Ladegerät	[-]
$k_{3,L}$	Betriebsbeiwert Ladegerät	[-]
$\eta_{G,L}$	Geräteausnutzungsgrad Ladegerät	[-]
$k_{2,T}$	Leistungseinflussfaktor Transportgerät	[-]
$k_{3,T}$	Betriebsbeiwert Transportgerät	[-]
$\eta_{G,T}$	Geräteausnutzungsgrad Transportgerät	[-]
L	Ladegerät	[-]
T	Transportgerät	[-]

Mindestanzahl Transportgeräte pro Ladegerät (Langzeitdurchschnitt):

$$n = \frac{t_{U,N}}{t_{f,N}} = 1 + \frac{\eta_{Total}^L (t_{FV} + t_E + t_{FL} + t_{WZ})}{\eta_{Total}^T \times t_f} \quad [-]$$

n	Anzahl Fahrzeuge pro Ladegerät	[-]
$t_{U,N}$	Umlaufzeit des Fahrzeugs (Langzeitleistung)	[min]
$t_{f,N}$	Wagenfolgezeit (Langzeitleistung)	[min]
t_f	Wagenfolgezeit (theoretisch)	[min]
t_{FV}	Fahrzeit voll	[min]
t_E	Entladezeit	[min]
t_{FI}	Fahrzeit leer	[min]
t_{WZ}	Wagenwechselzeit	[min]

LKW, SKW, Dumper

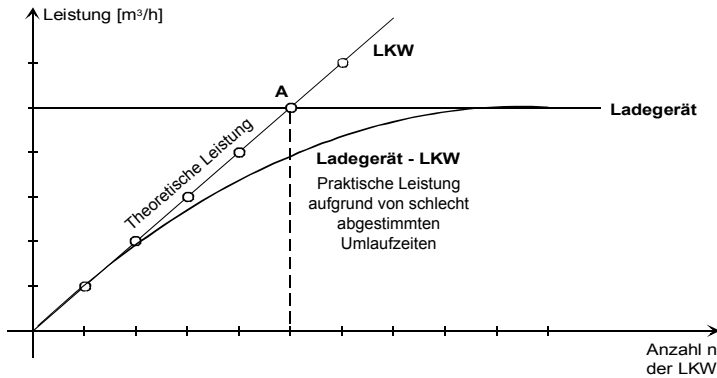


Bild 4-5: Leistung beim Ladegerät – LKW-System [30]

Planierraupen-Gesamtleistung $\sum_i Q_{P,N,i}$ [lm^3/h] zur Einebnung des Materials auf Einbaustrecke oder Kippe:

$$\sum_i Q_{P,N,i} \geq \frac{Q_{T,N}}{\alpha} \times n \times n_L \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

$Q_{P,N}$	Nutzleistung Planiergerät (Langzeitleistung)	$[\text{lm}^3/\text{h}]$
i	Anzahl Planiergeräte	$[-]$
$Q_{T,N}$	Nutzleistung Transportgerät (Langzeitleistung)	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
α	Lösefaktor	$[\text{fm}^3/\text{lm}^3]$
n	Anzahl Transportgeräte pro Ladegerät	$[-]$
n_L	Anzahl Ladegeräte	$[-]$

Anzahl der Planierraupen $n_{\text{Planierraupen}}$ $[-]$

$$n_{\text{Planierraupen}} \geq \frac{Q_{T,N}}{\alpha \times Q_{P,N}} \times n \times n_L \quad [-]$$

$n_{\text{Planierraupen}}$	Anzahl der Planierraupen	$[-]$
----------------------------	--------------------------	-------

LKW, SKW, Dumper



Die Prozesskettenleistung von Ladegerät-Transportgerät-Planierraupen-Betrieb:

$$Q_{\text{Proz},N} = \left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{Proz},N} | Q_{\text{Proz},N} = Q_{L,N} \times n_L \geq Q_{\text{erf},N} \\ \wedge Q_{\text{Proz},N} \leq Q_{T,N} \times n \times n_L \\ \wedge Q_{\text{Proz},N} \leq \sum Q_{P,N,i} \times \alpha \end{array} \right\} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

$$Q_{\text{erf},N} \leq Q_{\text{Proz},N} = Q_{L,N} \times n_L \leq Q_{T,N} \times n \times n_L \leq \sum Q_{P,N,i} \times \alpha$$

$$Q_{L,N} \leq Q_{T,N} \times n$$

$Q_{L,N}$	Nutzleistung Ladegerät	(Langzeitleistung)	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
$Q_{\text{erf},N}$	Erforderliche Nutzleistung		$[\text{fm}^3/\text{h}]$
$Q_{\text{Proz},N}$	Nutzleistung Prozesskette	(Langzeitleistung)	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
$Q_{T,N}$	Nutzleistung Transportgerät	(Langzeitleistung)	$[\text{fm}^3/\text{h}]$
$Q_{P,N}$	Nutzleistung Planiergerät	(Langzeitleistung)	$[\text{lm}^3/\text{h}]$
n	Anzahl Transportgeräte pro Ladegerät		$[-]$
n_L	Anzahl Ladegeräte		$[-]$
Leitgerät	$\equiv \text{Ladegerät} \equiv Q_{\text{min}} = Q_{L,N}$		

LKW, SKW, Dumper



Überschlägige Ermittlung der Antriebsleistung der Transportgeräte

Fahrbedingung für motorgetriebene Transportfahrzeuge

Übertragbare Zugkraft Z_R [kN] [3]

$Z_R \leq \mu \times G_R$		[kN]
Z_R	übertragbare Zugkraft	[kN]
μ	Bodenkraftschlussbeiwert	[-]
G_R	Reibungsgewichtskraft auf Antriebsachse	[kN]
	$G_R = 9.81 \times m_{L+EG \text{ Antriebsachse}}$	
$m_{L+EG \text{ Antriebsachse}}$	Last (L) und Eigenmasse (EG) auf der Antriebsachse	[t]

Motorzugkraft Z_M [kN] [3]

$Z_M = P_M / c = P_M \times 3.6 / v$		[kN]
Z_M	Motorzugkraft	[kN]
P_M	Leistung des Motors	[kW]
v	Geschwindigkeit	[km/h]
c	Geschwindigkeit	[m/s]

Umrechnungsfaktoren:

$$1 \text{ kW} = 100 \text{ kpm/s}$$

$$1 \text{ kp} = 1/100 \text{ kN}$$

$$\text{km/h} = 1/3.6 \text{ m/s}$$

Hakenzugkraft Z_H [kN] [3]

$Z_H = Z_M \times \eta_{\text{ges}}$		[kN]
$Z_H \approx P_M \times 3.6 / v \times \eta_{\text{ges}}$		[kN]
Z_H	Hakenzugkraft bzw. effektive Zugkraft zwischen Rad und Fahrbahn	[kN]
η_{ges}	mechanischer Nutzungsgrad ≈ 0.85	[-]

LKW, SKW, Dumper



Fahrwiderstände W_i [kN] [3]

Gesamtwiderstand W [kN]

W	$= W_R + W_S$	[kN]
W	Gesamtwiderstand (äusserer)	[kN]
W_R	Bahn-/Reibungswiderstand	[kN]
W_S	Steigungswiderstand	[kN]

Bahnwiderstand W_R [kN]

W_R	$= w_r \times m_T \times g$	[kN]
w_r	Rollwiderstandsbeiwert	[-]
m_T	Gesamtmasse des Fahrzeugs ($m = m_L + m_{EG}$)	[t]
g	Erdbeschleunigung: 9.81	[m/s ²]

Steigungswiderstand W_S [kN]

W_S	$= w_s \times m_T \times g$	[kN]
w_s	% Steigung	[-]
	für 1.0 % Steigung: $W_S \approx 0.01 \times m \times g$	[kN]

(Schürfwiderstände bei Schürffahrzeugen sind gesondert zu berücksichtigen.)

Berechnung der Anzugskraft

Die Anzugskraft des Transportgeräts muss das Fahrzeug von der Geschwindigkeit null auf die Geschwindigkeit v innerhalb der Strecke s beschleunigen. Die Anzugskraft muss zu den Widerstandskräften addiert werden, damit das Transportfahrzeug auch auf der Steigung anfahren kann.

LKW, SKW, Dumper



End- bzw. Streckengeschwindigkeit v [m/s]

$$v = a \times t$$

$$v = \sqrt{2 \times a \times l_a}$$

[m/s]

Erforderliche Beschleunigung a [m/s²]

$$a = \frac{v^2}{2 \times l_a}$$

[m/s²]

Anzugskraft zur Beschleunigung des Transportfahrzeugs Z_A [kN]

$$Z_A \geq (m_L + m_{EG}) \times a$$

[kN]

$$Z_A \geq (m_L + m_{EG}) \times \frac{v^2}{2 \times l_a}$$

[kN]

Z_A	Anzugskraft zur Beschleunigung des Transportfahrzeugs	[kN]
m_L	Lademasse	[t]
m_{EG}	Eigenmasse des Fahrzeugs	[t]
v	Streckengeschwindigkeit	[m/s]
l_a	Beschleunigungsstrecke	[m]
a	Beschleunigung	[m/s ²]
t	Beschleunigungszeit bis zur Geschwindigkeit v	[s]

Erforderliche Zugkraft Z_{erf} [kN]

$$Z_{\text{erf}} = W + Z_A$$

[kN]

Fahrbedingungen

$$Z_R \geq Z_H \geq Z_{\text{erf}}$$

[kN]

$$Z_H = Z_M \times \eta_{\text{ges}} \geq Z_{\text{erf}} = W + Z_A$$

[kN]

Fahrzeugwahl (P_M ; m_{L+EG}^{LKW} Antriebsachse; m_{EG}^{LKW} ; m_L^{LKW})

LKW, SKW, Dumper



Daraus lässt sich folgern:

Erforderliche Motorleistung P_M [kW]

$$P_{M, \text{erf}} = (W + Z_A) \times v / \eta_{\text{ges}} \quad [\text{kW}]$$

mit v in [m/s],

$$\text{ferner gilt } 1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h und } 1 \frac{\text{kN} \times \text{m}}{\text{s}} = 1 \text{ kW}$$

Erforderliche Gewichtskraft G_R [kN] auf die Antriebsachse (einschliesslich Ladung)

$$G_R \geq Z_{\text{erf}} / \mu \quad [\text{kN}]$$

Technisch mögliche/tatsächlich erreichbare Geschwindigkeit v [km/h]

$$v_{\text{mögl}} = P_M \times \eta_{\text{ges}} \times 3.6 / (G \times (w_r + w_s)) \quad [\text{km/h}]$$

$$v_{\text{tat}} = \kappa_1 \times v_{\text{mögl}} \quad [\text{km/h}]$$

κ_1 Geschwindigkeitsbeiwert [6], [7] [-]

G Gesamtgewicht des Fahrzeuges [kN]

Fahrbedingungsbeiwerte

Tabelle 4-3: Bodenkraftschlussbeiwert μ [3]

Bodenart:	Bodenkraftschlussbeiwert μ [-] Luftreifen
Feld, trockener Boden	0.90
trockener Asphalt, festgewalzter Schotter	0.80
trockener Lehm und Ton, sonstiger Boden	0.70
feuchter Lehm und Ton, loser Boden	0.50
feuchter Asphalt, loser Feinsand	0.40
lockerer Grobkies	0.30

LKW, SKW, Dumper



Tabelle 4-4: Geschwindigkeitsbeiwert κ_1 [-] [3]

Länge der einfachen Fahrstrecke l [m]	Geschwindigkeitsbeiwert κ_1 [-]
150	0.50
300	0.60
600	0.70
900	0.75
1200	0.85
>1200	0.90

Tabelle 4-5: Rollwiderstandsbeiwert w_r [-] [3]

Bodenart:	Rollwiderstandsbeiwert w_r [-] Luftreifen
rauher, trockener Boden	0.020
unbefestigte, durchfeuchtete Wege	0.075
halbfeste Erdwege	0.050
loser Sand und Kies	0.100
schlammige Fahrbahn, frisch aufgeschüttetes Gelände	0.100



4.2 Gleisförderung

Die Berechnung der Gleisförderung [2], [14], [31] teilt sich in neun Abschnitte auf:

1. Transportabschnitte
2. Transportleistung des Zugs
3. Fahrwiderstände
4. Lokberechnung
5. Zugkraftkontrolle
6. Ermittlung der Bremsneigung
7. Ermittlung der Bremsausrüstung
8. Fahrzeitberechnung
9. Gleis

1. Transportabschnitte

Die gesamte Transportstrecke wird in Abschnitte gleicher Fahrbedingungen unterteilt:

- Beladestelle l_B [m]
- Teilstrecken i bei vollem Transportfahrzeug l_{iv} [m]
- Entladestelle l_E [m]
- Teilstrecken i bei leerem Transportfahrzeug l_{il} [m]

Bei einspurigem Betrieb sollten entsprechend den Zugfolgen und der Zugdichte Ausweichstellen vorgesehen werden.

2. Transportleistung des Zugs [14]

Wahl der Spurweite:

Tabelle 4-6: Auswahlkriterien der Spurweite [14]

		Schmalspur		Normalspur
		leicht 600 mm	schwer 900 mm	1435 mm
Wageninhalt	[m ³]	0.75 – 2.00	2.00 – 5.00	15 – 100
Motorleistung der Lok	[PS]	40 – 90	90 – 250	100 – 2000
Fahrtgeschwindigkeit	[km/h]	0 – 20	0 – 30	0 – 60

Gleisförderung



Wagengrösse [14]

Massgebend dafür ist im Wesentlichen der Beladevorgang:

- chargenweises Laden mit Löffel oder Schaufel
- optimal wäre $\frac{\text{Ladefassvolumen}}{\text{Wageninhalt}} = \frac{V_{\text{SAE}}}{V_{\text{W100}}} = \frac{1}{4} \text{ bis } \frac{1}{6}$
- kontinuierliches Beladen des ganzen Zugs, wobei auf verdeckte Wagenübergänge und langsames Nachrücken des Zugs zu achten ist

Wagenzahl des Zugs

- Ausgangslage
- gewünschte Nutzförderleistung Q_N [fm^3/h]
 - Volumen eines Hubs der TBM V_{Hub} [fm^3]

Ermittlung der Nutzladung eines Wagens V_W [fm^3]

$V_W = V_{\text{W100}} \times \alpha \times \varphi$		[fm^3]
V_W	Nutzladung eines Wagens	[fm^3]
V_{W100}	Nenninhalt des Wagens	[m^3]
α	Lösefaktor	[fm^3/lm^3]
φ	Füllfaktor	[-]

Nutzladung des gesamten Zugs V_{Zug} [fm^3]

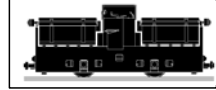
$V_{\text{Zug}} = n \times V_W$		[fm^3]
V_{Zug}	Nutzladung des gesamten Zugs	[fm^3]
n	Anzahl der Wagen	[-]
V_W	Nutzladung eines Wagens	[fm^3]

Beispiel:

Die gesamte Nutzladung des Zugs sollte das Ausbruchmaterial eines ganzen TBM-Hubs aufnehmen können:

$$V_{\text{Hub}} = V_{\text{Zug}} \quad [\text{fm}^3]$$

Gleisförderung



Wagenmasse des gesamten Zugs m_w [t]

Enthält die Förderstrecke Neigungen, so sollten zumindest der erste und der letzte Wagen mit einer Bremsenrichtung ausgerüstet sein. Dies wirkt sich auf die Masse des Gesamtzugs aus.

$m_w = (n - 2) \times m'_w + 2 \times m'_{wb} + n \times V_{w100} \times \varphi \times \rho_s$		[t]
m_w	Gesamtwagenmasse des Zugs	[t]
n	Anzahl der Wagen	[-]
m'_w	Masse des Wagens ohne Bremse	[t]
m'_{wb}	Masse des Wagens mit Bremse	[t]
V_{w100}	Nenninhalt eines Wagens	[m ³]
φ	Füllfaktor	[-]
ρ_s	Schüttdichte	[t/m ³]

3. Fahrwiderstände [14]

$w_m = w_r + w_k \pm w_s$		[-]
w_m	Gesamtfahrwiderstandsbeiwert	[-]
w_r	Rollwiderstandsbeiwert	[-]
w_k	Kurvenwiderstandsbeiwert	[-]
w_s	Steigwiderstandsbeiwert	[-]

Steigwiderstandsbeiwert w_s [-]

Die vorhandene Steigung [%] entspricht dem Steigwiderstandsbeiwert w_s [-], z.B. 3 % Steigung entsprechen $w_s = 0.03$.

Gleisförderung



Gesamtfahrwiderstand der Wagen $W_{m(W)}$ [kN]

$W_{m(W)} = w_{m(W)} \times m_W \times g$	[kN]
$w_{m(W)} = w_{r(W)} + w_{k(W)} + w_s$	[-]
$W_{m(W)}$	Gesamtfahrwiderstand der Wagen [kN]
$w_{m(W)}$	Gesamtfahrwiderstandsbeiwert [-]
$w_{r(W)}$	Rollwiderstandsbeiwert der Wagen [-]
$w_{k(W)}$	Kurvenwiderstandsbeiwert der Wagen [-]
m_W	Gesamtwagenmasse des Zugs [t]
g	Erdbeschleunigung: 9.81 [m/s ²]

Die Widerstandsbeiwerte beinhalten die gesamten Bewegungswiderstände des Rad-Schiene-Systems (Reibung Rad-Schiene und Rad-Achse).

4. Lokberechnung [14]

Erforderliche Reibungszugkraft der Lok Z_{RL} [kN]

$Z_{RL} \geq W_{m(W)} + W_{m(L)}$	[kN]
Z_{RL}	erforderliche Reibungszugkraft der Lok [kN]
$W_{m(W)}$	Gesamtfahrwiderstand der Wagen [kN]
$W_{m(L)}$	Fahrwiderstand der Lok [kN]

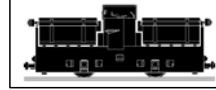
Um jedoch den Fahrwiderstand der Lok ermitteln zu können, wird das Loggewicht benötigt; deshalb wird in die Rechnung eingesetzt:

$W_{m(W)} \approx W_{m(L)}$	[kN]
$Z_{RL} \geq 2 \times W_{m(L)}$	

Damit lässt sich die erforderliche **Reibungsgewichtskraft der Lok G_{RL} [kN]** ermitteln:

$G_{RL} \geq \frac{Z_{RL}}{\mu} \geq \frac{2 \times W_{m(L)}}{\mu}$	[kN]
G_{RL}	Reibungsgewichtskraft der Lok auf den Antriebsrädern [kN]
μ	Kraftschlussbeiwert Rad-Schiene [-]

Gleisförderung



Übertragbare Zugkraft der Lok auf die Schienen:

$Z_{RL} = G_{RL} \times \mu = m_L \times g \times \mu$	[kN]
--	------

m_L	Masse der Lok (alle Räder = Antriebsräder)	[t]
-------	--	-----

Fahrwiderstand der Lok $W_{m(L)}$ [kN]

$W_{m(L)} = G_{RL} \times w_{m(L)} = G_{RL} \times (w_{r(L)} + w_{k(L)} + w_s)$	[kN]
---	------

$W_{m(L)}$	Fahrwiderstand der Lok	[kN]
$w_{m(L)}$	Gesamtfahrwiderstandsbeiwert der Lok	[-]
$w_{r(L)}$	Rollwiderstandsbeiwert der Lok	[-]
$w_{k(L)}$	Kurvenwiderstandsbeiwert der Lok	[-]
G_{RL}	Reibungsgewichtskraft der Lok auf den Antriebsrädern	[kN]

Die Widerstandsbeiwerte beinhalten die gesamten Bewegungswiderstände des Rad-Schiene-Systems (Reibung Rad-Schiene und Rad-Achse). Die entsprechenden Widerstandsbeiwerte müssen bei den Rollmaterialherstellern angefragt werden.

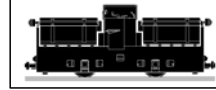
Kraftschlussbeiwert Rad-Schiene μ [-]

- | | |
|-----------------|---------------|
| – nass | 0.050 – 0.100 |
| – trocken | 0.100 – 0.150 |
| – Sand gestreut | 0.200 – 0.250 |

Danach kann ein zweckmässiger Loktyp gewählt werden:

- | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------|
| – Motorleistung | P _{mo} | [PS bzw. kW] |
| – Lokgewichtskraft/Lokmasse | G _L | [kN] / m _L [t] |
| – Reibungsgewichtskraft | G _{RL} | [kN] |
| – Maschinenzugkraft | Z _M | [kN] |

Gleisförderung



5. Zugkraftkontrolle

Ermittlung des **Fahrwiderstands der Lok $W_{m(L)}$ [kN] [14]**

$W_{m(L)} = w_{m(L)} \times m_L \times g$	[kN]
mit $m_L \times g \geq G_{RL}$	[kN]

$W_{m(L)}$	Fahrwiderstand der Lok	[kN]
$w_{m(L)}$	Gesamtfahrwiderstandsbeiwert der Lok	[-]
m_L	Masse der Lok	[t]

Das Lokgewicht ist dann grösser als das Reibungsgewicht der Antriebsräder, wenn nicht alle Räder gleichzeitig Antriebsräder sind.

Gesamtfahrwiderstand des Zugs W_m [kN] [14]

$W_m = W_{m(L)} + W_{m(W)}$	[kN]
-----------------------------	------

Somit ist der erforderliche Zugkraftanteil der Lok Z_R zur Überwindung der Reibung:

$Z_R \geq W_m$	[kN]
----------------	------

Erforderliche Anzugskraft des Zugs Z_A [kN]

$Z_A \geq (m_L + \sum m_{wi}) \times a$	[kN]
mit $a = \frac{v^2}{2 \times l_a}$	[m/s ²]

m_L	Masse der Lok	[t]
m_{wi}	Gesamtmasse des Wagens i (Eigenmasse und Lademasse)	[t]
v	Streckengeschwindigkeit	[m/s]
l_a	Beschleunigungsstrecke	[m]
a	Beschleunigung	[m/s ²]

Näherungsweise kann zur Bestimmung der erforderlichen Anzugskraft Z_A folgende auf Erfahrung beruhende Beziehung verwendet werden [14]:

$Z_A \leq 0.75 \times Z_{RL}$	[kN]
-------------------------------	------

Mit dieser Anzugskraft Z_A ist ein kraftschlüssiges Anfahren der Lok auf einer geraden Rampe mit 1 ‰ Steigung noch möglich.

Gleisförderung



Erforderliche Gesamtzugkraft der Lok Z_L [kN]

$$Z_L = Z_R + Z_A \quad [\text{kN}]$$

Achtung: Zur Ermittlung der Gesamtzugkraft der Lok Z_L die obere Grenze der Gesamtwiderstände einsetzen.

Antriebskraft der Lok Z_{Antrieb} [kN] auf der Schiene

$$Z_{\text{Antrieb}} = \frac{P_M \times 3.6}{v} \times \eta_{\text{Ges}} \quad [\text{kN}]$$

Z_{Antrieb}	Antriebskraft der Lok, umgesetzt auf die Schiene	[kN]
P_M	Motorleistung	[kW]
v	Streckengeschwindigkeit	[km/h]
η_{Ges}	Mechanischer Nutzungsgrad Motor-Schiene ≈ 0.85	[m/s ²]

Die **erforderliche Masse der Lok m_L [t]** zum Anfahren und zur Überwindung der Reibung ergibt sich aus:

$$m_L \geq \frac{Z_L}{\mu \times g} \quad [\text{t}]$$

μ	Kraftschlussbeiwert Rad-Schiene	[-]
-------	---------------------------------	-----

Bedingung zur Lokauswahl:

$$Z_{RL} > Z_{\text{Antrieb}} > Z_L \quad [\text{kN}]$$

Lokauswahl mit (P_M ; m_L)

Falls diese Forderungen nicht erfüllt sind, muss

- a) eine schwerere Lok
 - b) eine kleinere Wagenzahl
 - c) ein grösserer Kurvenradius
 - d) eine flachere Steigung
- gewählt werden.

Gleisförderung



6. Ermittlung der Bremsneigung [14]

Die günstigste Neigung für Talfahrt ergibt sich aus dem Beharrungszustand bei gleichförmiger Bewegung, d.h. wenn

- Zugkraft = 0
- Bremskraft = 0

Allgemein gilt für die günstigste Neigung, die so genannte Bremsneigung:

$i_{br} = w_{r(W)} + w_{k(W)}$		[-]
i_{br}	Bremsneigung	[-]
$w_{r(W)}$	Rollwiderstandsbeiwert der Wagen *)	[-]
$w_{k(W)}$	Kurvenwiderstandsbeiwert der Wagen *)	[-]

Diese Bremsneigung ist bei der Trassierung einer Strecke möglichst zu berücksichtigen. Es ist fahrdynamisch am günstigsten, die erforderlichen Gleisrampen mit "Bremsneigung" anzulegen.

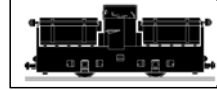
*) Achtung: Zur Ermittlung von Bremsneigung und Bremskraft die untere Grenze der Gesamtwiderstände einsetzen.

7. Ermittlung der Bremsausrüstung

Erforderliche Bremskraft B_{r-erf} [kN] des Zugs

$B_{r-erf} = B_b + B_i$		[kN]
B_b	Verzögerungskraft, um den Zug von der Fahrgeschwindigkeit v innerhalb der Strecke l_b in der Horizontalen zu stoppen	[kN]
B_i	überschüssige Gefälle kraft	[kN]

Gleisförderung



$$B_b = (m_L + m_W) \times b = (m_L + m_W) \times \frac{v^2}{2 \times l_b} \quad [\text{kN}]$$

$$B_i = g \times (m_L \times (i - w_{r,L}) + m_W \times (i - w_{r,W})) \quad [\text{kN}]$$

m_L	Masse der Lok	[t]
m_W	Gesamtwagenmasse des Zugs	[t]
i	maximales Gefälle	[-]
$w_{r,L}$	Rollwiderstandsbeiwert der Lok (beim Bremsen untere Grenze)	[-]
$w_{r,W}$	Rollwiderstandsbeiwert der Wagen (beim Bremsen untere Grenze)	[-]
b	Bremsverzögerung	[m/s ²]
v	Fahrgeschwindigkeit	[m/s]
l_b	Bremsstrecke	[m]
g	Erdbeschleunigung: 9.81	[m/s ²]

Mögliche Bremskraft $B_{r\text{-möglich}}$ [kN] des Zugs

$$B_{r\text{-möglich}} = g \times (m_L + r \times m_{wtb}) \times \mu \quad [\text{kN}]$$

r	Anzahl der Wagen mit Bremse	[-]
m_{wtb}	Gesamtmasse des Wagens mit Bremse (Eigenmasse und Lademasse)	[t]
μ	Bremskraftschlussbeiwert Rad-Schiene	[-]

Die **erforderliche Anzahl r [-] von Wagen mit Bremse** ergibt sich aus:

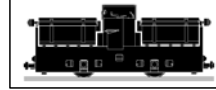
$$B_{r\text{-möglich}} \geq B_{r\text{-erf}}$$

$$r \geq \frac{1}{g \times m_{wtb}} \left[\frac{(m_L + m_W) \left(\frac{v^2}{2 \times l_b} + i \times g \right) - (m_L \times w_{r,L} + m_W \times w_{r,W}) g}{\mu} - m_L \times g \right]$$

Gültigkeitsbereich

$$r = \left\{ \begin{array}{l} r \mid r = a; a \in \mathbb{R}^+ \wedge n_i < a < n_{i+1} \Rightarrow r = n_{i+1}; \\ a \in \mathbb{R}^- \Rightarrow r = 0; a \in \mathbb{N} \wedge a = n_i \Rightarrow r = n_i \end{array} \right\}$$

Gleisförderung



8. Fahrzeitberechnung [14]

Gesamtfahrzeit T [min]

$$T = \frac{L \times 60}{v} + \Delta t_a + \Delta t_b \quad [\text{min}]$$

T	Gesamtfahrzeit	[min]
L	Länge der Transportstrecke	[km]
v	mittlere Streckengeschwindigkeit	[km/h]
Δt_a	Anfahrzeitzuschlag	[min]
Δt_b	Bremszeitzuschlag	[min]

mit

$$\text{Geschwindigkeit } v = \frac{P_M \times \eta_{\text{Ges}}}{G_{\text{RL}} \times \mu} \times 3.6 \quad [\text{km/h}]$$

v	Fahrgeschwindigkeit	[km/h]
P_M	Motorleistung	[kW]
G_{RL}	Reibungsgewichtskraft der Lok (alle Räder = Antriebsräder)	[kN]
μ	Kraftschlussbeiwert Rad-Schiene	[-]

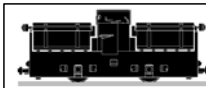
$$\text{Anfahrzeitzuschlag } \Delta t_a = \frac{v}{3.6 \times 60 \times a_a} \quad [\text{min}]$$

Δt_a	Anfahrzeitzuschlag	[min]
v	Geschwindigkeit, auf die der Zug beschleunigt wird	[km/h]
a_a	Anfahrbeschleunigung	[m/s ²]

$$\text{Anfahrbeschleunigung } a_a \approx \frac{Z_{\text{Antrieb}} - W_m}{m} \quad [\text{m/s}^2]$$

Z_{Antrieb}	Anfahrzugkraft/Antriebskraft der Lok	[kN]
W_m	Gesamtfahrwiderstand	[kN]
m	Masse des Zugs	[t]

Gleisförderung



$$\text{Bremszeitzuschlag } \Delta t_b = \frac{2 \times l_b}{v} = \frac{v}{3,6 \times 60 \times a_b} \quad [\text{min}]$$

Δt_b	Bremszeitzuschlag	[min]
l_b	Bremsstrecke	[m]
v	Geschwindigkeit, bei der der Zug abgebremst wird	[km/h]
a_b	Bremsverzögerung	[m/s ²]

9. Gleis

Dimensionierung der Schienen

Zur baubetrieblichen Vordimensionierung der Schienen, bei gewähltem Schwellenabstand, können aufgrund des für die Schienen zugelassenen Achsendrucks und der Spurweite die Schienenprofile gewählt werden.

Tabelle 4-7: Daten verschiedener Profile [14], [32]

Profil nach DIN 5901	Masse [kg/m]	Spurweite [mm]	Zulässiger Achsdruck in [kN] bei Schwellenabstand [cm]			
			60	70	80	100
S 10	10.0	600	42.18	36.30	31.39	25.51
S 14	14.0	600 – 750	63.77	54.94	48.07	38.26
S 20	19.8	750 – 900	115.76	99.08	86.33	69.65
S 33	33.47	900 – 1435	–	228.57	200.12	159.90
S 41 R 10	41.38	900 – 1435	–	286.45	247.21	201.11
S 49	49.43	900 – 1435	–	351.20	308.03	245.25

Bandförderung



4.3 Bandförderung

Nutzleistung Q_N [lm^3/h]

$Q_N = A_F \times v \times 3600 \times f_\beta \times f_\varphi \times f_5 \times \eta_G$	[lm^3/h]
mit $Q_0 = A_F \times v \times 3600$	[lm^3/h]
$f_2 = f_\beta \times f_\varphi \times f_5$	[-]
wird	
$Q_N = Q_0 \times f_2 \times \eta_G$	[lm^3/h]
Q_N	Nutzleistung (loses Material) [lm^3/h]
Q_0	Grundförderleistung (loses Material) [lm^3/h]
A_F	theoretischer Füllquerschnitt des Förderbands [m^2]
v	Fördergeschwindigkeit [m/s]
f_β	Korrekturfaktor für die Bandneigung [-]
f_φ	Korrekturfaktor für die Ungleichförmigkeit der Beschickung (= 0.5 – 1.0, abhängig vom Ladegerät) [-]
f_5	Gerätezustandsfaktor [-]
η_G	Geräteausnutzungsfaktor [-]

Tabelle 4-8: Bandsteigungsbereich φ [°] [14]:

	Steigung φ [°]
Feinkörniges Gut	25
Grobkörniges Gut	18
Rolliges Gut	14
Steilförderband	< 40

Bandförderung

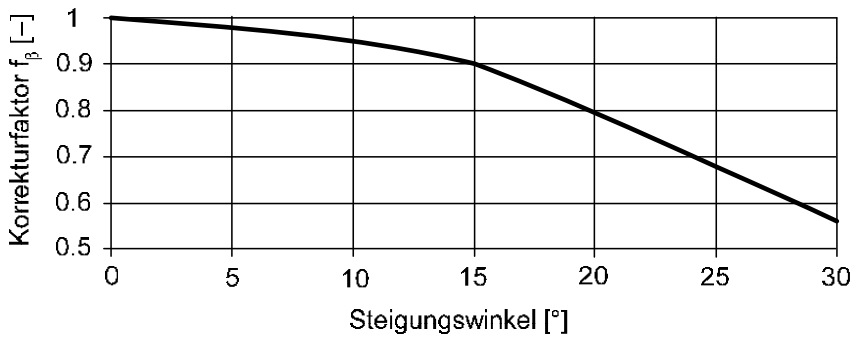
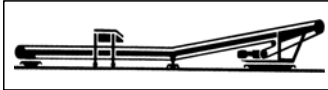


Bild 4-6: Korrekturfaktor f_{β} – Einfluss des Steigungswinkels auf den Fördergutstrom [14]

Tabelle 4-9: Optimale Bandbreite b zur maximalen Korngrösse [14]

Bandbreite b [mm]	maximale Korngrößen	
	bei Einzelkomponenten [mm]	bei Gemisch [mm]
400	100	180
500	120	200
650	160	260
800	200	300
1000	250	380
1200	300	450

Tabelle 4-10: Bandgeschwindigkeit v [14]

	v [m/s]
Stückgut	1.0 – 2.0
Schüttgut	1.5 – 6.0
Staubgut	< 7.0
Spitzengeschwindigkeit für Laden von erdfeuchtem, feinkörnigem Boden	8.0 – 12.0

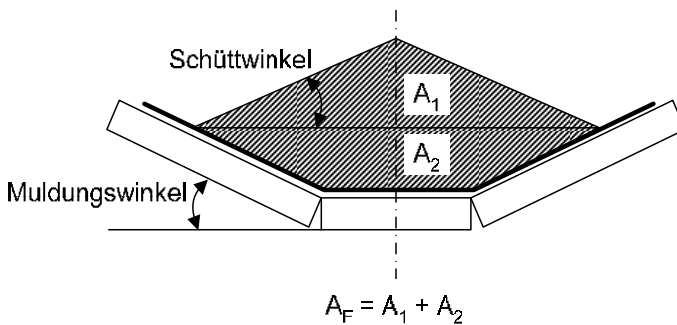
Bandförderung



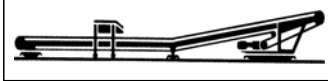
Tabelle 4-11 Theoretischer Füllquerschnitt A_F des Förderbandes [14], [33]

Theoretische Füllquerschnitte für dreiteilig gemuldete Bänder [m²]

Bandbreite B [mm]	Schütt- winkel	Muldwinkel				
		20°	25°	30°	35°	45°
500	10°	0.0167	0.0188	0.0205	0.0220	0.0244
	15°	0.0200	0.0221	0.0237	0.0250	0.0268
	20°	0.0238	0.0256	0.0270	0.0282	0.0298
650	10°	0.0300	0.0336	0.0336	0.0394	0.0441
	15°	0.0360	0.0398	0.0424	0.0447	0.0487
	20°	0.0425	0.0460	0.0485	0.0505	0.0540
800	10°	0.0470	0.0525	0.0575	0.0620	0.0685
	15°	0.0570	0.0623	0.0665	0.0700	0.0756
	20°	0.0665	0.0720	0.0760	0.0790	0.0837
1000	10°	0.0750	0.0850	0.0925	0.0990	0.1095
	15°	0.0910	0.1000	0.1070	0.1130	0.1210
	20°	0.1070	0.1160	0.1220	0.1270	0.1340
1200	10°	0.1110	0.1240	0.1360	0.1460	0.1620
	15°	0.1325	0.1470	0.1570	0.1660	0.1780
	20°	0.1570	0.1700	0.1790	0.1870	0.1970
1400	10°	0.1530	0.1720	0.1870	0.2010	0.2220
	15°	0.1840	0.2020	0.2160	0.2280	0.2450
	20°	0.2170	0.2340	0.2470	0.2580	0.2710
1600	10°	0.2020	0.2260	0.2470	0.2650	0.2950
	15°	0.2430	0.2680	0.2860	0.3020	0.3260
	20°	0.2870	0.3140	0.3260	0.3400	0.3610



Bandförderung



Antriebsleistung eines Bandes

Grundförderleistung des Bandes $\bar{Q}_0$ [t/h]

Gesamtkraft des Bandes F_B [kN]		
$F_B = (F_R + F_V + F_A) \times \gamma$		[kN]
$F_R = [(2 \times m_G + m_L) \times \cos \beta + \bar{m}_R] \times g \times \eta_B \times L$		[kN]
$F_V = \pm (m_L + 2 \times m_G) \times g \times H$		[kN]
$H = L \times \sin \beta$		[m]
$F_A = (2 \times m_G + m_L + \bar{m}_R) \times a_{a/b} \times L$		[kN]
$a_{a/b} = \frac{v}{t_{ab}} = \frac{v^2}{2 \times l_{a/b}}$		[m/s ²]
$\bar{m}_R = \frac{m_{Ro}}{l_o} + \frac{m_{Ru}}{l_u}$		[t/m]
$\bar{Q}_0 = Q_0 \times \rho_F$		[t/h]
$m_L = \frac{\bar{Q}_0}{3600 \times v}$		[t]

F_R	Reibungskraft des Bandes	[kN]
F_V	Steigungs-/Neigungskraft des Bandes	[kN]
F_A	Beschleunigungs-/Bremskraft des Bandes	[kN]
$m_{Go} = m_G$	Masse des oberen Bandes	[t/m]
$m_{Gu} = m_G$	Masse des unteren Bandes	[t/m]
$\bar{m}_R$	Masse der Laufrollen	[t/m]
m_L	Masse des Förderguts	[t/m]
m_{Ro}	Masse einer Laufrolle oben	[t]
m_{Ru}	Masse einer Laufrolle unten	[t]
l_o	Abstand der Laufrollen oben	[m]
l_u	Abstand der Laufrollen unten	[m]
η_B	Bandreibung an Rollen sowie Antriebs- und Umlenktrommel	[-]
β	Neigung des Bandes	[°]
L	Gesamtlänge des Bandes	[m]
H	maximale Höhendifferenz des Bandes	[m]

Bandförderung



γ	Sicherheitsfaktor (ca. 30 % $\triangleq$ 1.3)	[-]
Q_0	Grundförderleistung des Bandes	[lm^3/h]
$\overline{Q}_0$	Grundförderlastleistung des Bandes	[t/h]
v	Bandgeschwindigkeit	[m/s]
$a_{a/b}$	Beschleunigung bzw. Verzögerung des Bandes	[m/s^2]
$l_{a/b}$	Beschleunigungs- bzw. Bremsstrecke des Bandes	[m]
$t_{a/b}$	Beschleunigungs- bzw. Bremszeit	[s]
ρ_F	Dichte des losen Fördergutes	[t/lm^3]

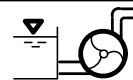
Die **Antriebsleistung** P_A [kW] beträgt

$P_A = F_B \times v$	[kW]
----------------------	------

Motorleistung P_M [kW]

$P_M = \frac{P_A}{\eta_M}$	[kW]
----------------------------	------

η_M	Wirkungsgrad 0.8 bis 0.9	[-]
----------	--------------------------	-----



4.4 Flüssigkeitsförderung

Bernoullische Gleichung für stationäre Bewegung mit Verlust in Rohrleitungen

$$\frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{v_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{v_2^2}{2 \times g} + z_2 + h_v \quad [\text{m}]$$

$$v_i = \frac{Q}{3600 \times A_i} \quad [\text{m/s}]$$

$$\text{Re}_j = \frac{v_j \times d_j}{\nu} \quad [-]$$

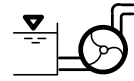
$$\lambda_j = \left[-2 \times \log \left[2.7 \times \frac{(\log \text{Re}_j)^{1.2}}{\text{Re}_j} + \frac{1}{3.71} \times \frac{k_j}{d_j} \right] \right]^{-2} \quad [-]$$

$$h_{v,j} = \lambda_j \times \frac{l_j}{d_j} \times \frac{v_j^2}{2 \times g} \quad [\text{m}]$$

$$h_{v0,k} = \zeta_k \times \frac{v_k^2}{2 \times g} \quad [\text{m}]$$

$$h_v = \left(\sum_j h_{v,j} + \sum_k h_{v0,k} \right) \times \eta_{\text{visko}} \quad [\text{m}]$$

$\frac{p_i}{\rho \times g}$	Druckhöhe am Punkt i der Rohrleitung	[m]
$\frac{v_i^2}{2 \times g}$	Geschwindigkeitshöhe am Punkt i der Rohrleitung	[m]
p_i	Druck am Punkt i in der Rohrleitung	[kPa]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
ρ	Rohdichte der Flüssigkeit	[t/m ³]
z_i	geodätische Höhe des Punktes i der Rohrleitung	[m]
h_v	Gesamtverlusthöhe zwischen Punkt 1 und 2 der Rohrleitung	[m]
v_i	Fließgeschwindigkeit im gefüllten Rohrquerschnitt am Punkt i	[m/s]



Q	Fördermenge (Q_{FF} bei Feststoff-Flüssigkeitsförderung, Q_F bei Flüssigkeitsförderung)	$[m^3/h]$
A_i	Querschnittsfläche des durchflossenen Rohrquerschnitts am Punkt i	$[m^2]$
Re_j	Reynoldszahl im Abschnitt j der Rohrleitung	$[-]$
d_i	Durchmesser der Rohrleitung im Abschnitt j	$[m]$
ν	kinematische Viskosität der Flüssigkeit	$[m^2/s]$
λ_j	Widerstandsbeiwert im Abschnitt j der Rohrleitung	$[-]$
k_j	Rauigkeitswert der Rohrleitung im Abschnitt j	$[mm]$
$h_{V,j}$	Reibungsverlusthöhe im Abschnitt j mit gleicher Beschaffenheit der Rohrleitung	$[m]$
l_j	Länge des Abschnitts j der Rohrleitung	$[m]$
v_j	Fließgeschwindigkeit im Abschnitt j der Rohrleitung	$[m/s]$
$h_{V0,k}$	Verlusthöhe durch örtliche Einbauten an Punkten k der Rohrleitung	$[m]$
ζ_k	Verlustbeiwert für Einbauten, Querschnittsänderungen an den Punkten k der Rohrleitung	$[-]$
v_k	Fließgeschwindigkeit direkt hinter den Einbauten an den Punkten k der Rohrleitung	$[m/s]$
η_{visko}	Viskositätsfaktor (Wasser: $\eta_{visko}^W = 1.0$; Bentonit: $\eta_{visko}^B = 1.1$)	$[-]$
i, j, k	Orts- bzw. Abschnittsbezeichnungen entlang der Rohrleitung	$[-]$

Bestimmung des Widerstandsbeiwerts λ_j über einen bestimmten Rohrabschnitt j

Die Rohrleitung wird in Teile gleicher Beschaffenheit eingeteilt. Zu beachten sind die absolute Rauheit des Rohres k_j sowie der Durchmesser d_j . Durch Bestimmung von Re_j und des Verhältnisses k_j / d_j kann λ_j für die Rohrleitungsabschnitte j aus Bild 4-7 entnommen werden. Dies geschieht durch das geradlinige Verbinden der Werte Re_j und k_j / d_j im Diagramm. λ_j kann als Schnittpunkt der Linie Re_j - k_j / d_j mit dem Graphen λ abgelesen werden.

Flüssigkeitsförderung

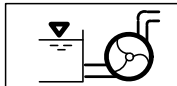


Tabelle 4-12: Kinematische Viskosität
 ν [m²/s] von Wasser nach [35]

Temperatur [°C]	Kinematische Viskosität ν [m ² /s]
0	1.78×10^{-6}
10	1.30×10^{-6}
20	1.00×10^{-6}
30	8.06×10^{-7}
40	6.57×10^{-7}
50	5.50×10^{-7}
60	4.78×10^{-7}
100	2.94×10^{-7}

Tabelle 4-13: Rauigkeitswerte k [mm] für Rohre [36]

Rohrwerkstoff	Zustand der Rohrwand	Rauigkeitswert k [mm]
gezogenen Rohre aus Kupfer und Mes- sing, Kunststoffen, Glas	technisch glatt	0.0013 – 0.0015
Gummidruck- schlauch	glatt	0.0016
nahtlose Stahlrohre	neu, Walzhaut	0.02 – 0.06
	neu, gebeizt	0.03 – 0.04
	neu, verzinkt	0.07 – 0.16
längsgeschweisste Stahlrohre	neu, Walzhaut	0.04 – 0.1
	neu, bituminiert	0.01 – 0.05
	neu, galvanisiert	0.008
Stahlrohr nach länge- rer Benützung	mässig verrostet bzw. leicht verkrustet	0.15 – 0.2
	stark verkrustet	bis 2.5
gusseiserne Rohre	neu mit Gusshaut	0.2 – 0.6
	neu bituminiert	0.1 – 0.13
	leicht angerostet	0.5 – 1.5
	verkrustet	1.5 – 4

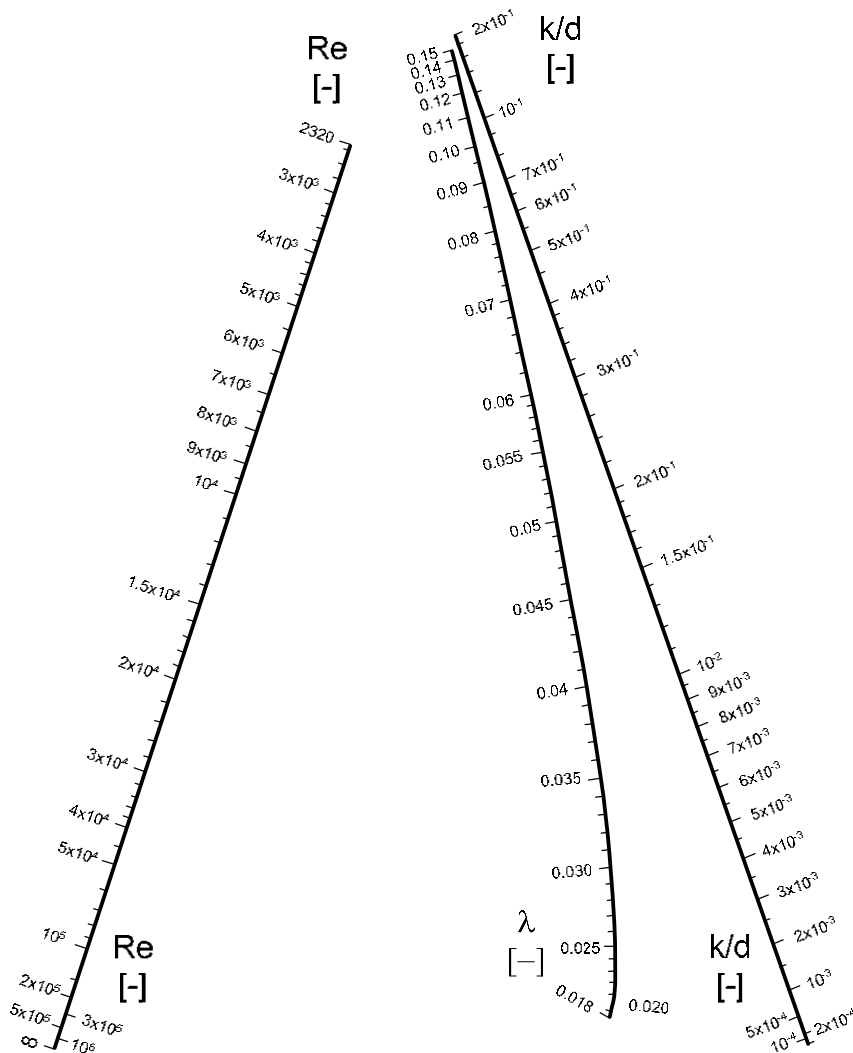
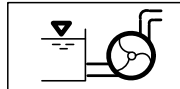
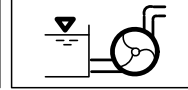


Bild 4-7: Nomogramm zur Bestimmung des Widerstandsbeiwerts λ_j nach [34], [37]

Nomogramm zur **Bestimmung von λ_j [-]** bei bekannter Reynoldszahl Re und bekanntem Verhältnis Rohrrauigkeit k /Rohrdurchmesser d



Bestimmen von lokalen Druckverlusten in Rohrleitungen

Eintrittsverluste ζ_E [-]

Tabelle 4-14: Verlustbeiwerte ζ_E [-] für Einlauf aus offenem Becken in ein Rohr [38]

Beschreibung	Verlustbeiwert ζ_E [-]
dünnwandiges Rohr, aus einer senkrechten Wand herausragend	0.60 – 1.30
nicht erweiterter Einlauf mit rechtwinkligen Kanten	≈ 0.50
nicht erweiterter Einlauf mit geringer Kantenausrundung	≈ 0.25
gut ausgebildete Einlauftrompete mit stark ausgerundeten Kanten, ggf. mit günstig geformtem Zwischenpfeiler	0.06 – 0.10

Verlustbeiwerte $\zeta_{R\Delta}$ [-] für Richtungsänderungen

Verlustbeiwerte ζ_{KK} [-] für glatte Kreiskrümmen

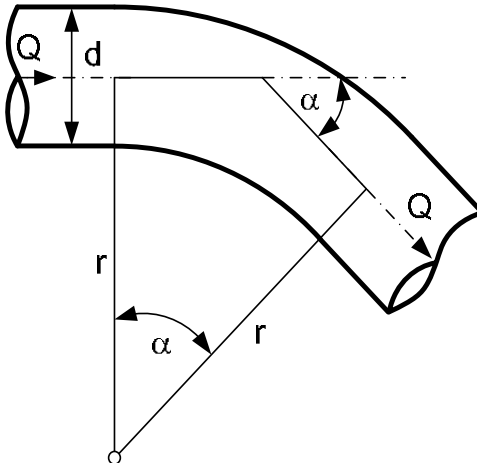


Bild 4-8: Kreiskrümmen [38]

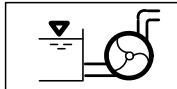


Tabelle 4-15: Verlustbeiwerte ζ_{KK} [-] für Kreiskrümmen [38]

ζ_{KK} [-]		Umlenkwinkel α [°]					
		15	22.5	30	45	60	90
r/d	2	0.030	0.045	0.060	0.090	0.120	0.140
	3	0.030	0.045	0.055	0.080	0.100	0.130
	5	0.030	0.045	0.050	0.070	0.080	0.110
	10	0.030	0.045	0.050	0.070	0.070	0.110

Verlustbeiwerte ζ_K [-] für Kreisrohr-Kniestücke

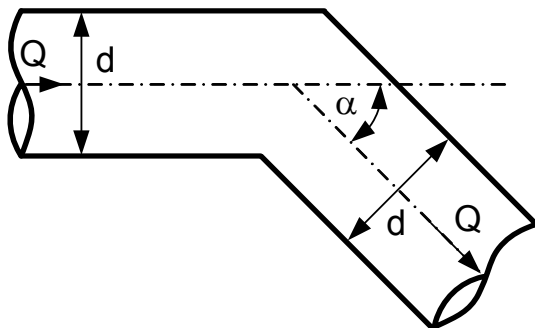
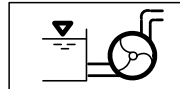


Bild 4-9: Kreisrohr-Kniestück [38]

Tabelle 4-16: Verlustbeiwerte ζ_K [-] für Kreisrohr-Kniestücke [39]

ζ_K [-]		Umlenkwinkel α [°]						
		10	15	22.5	30	45	60	90
Wandung	glatt	0.034	0.042	0.066	0.130	0.236	0.471	1.129
	rau	0.044	0.062	0.154	0.165	0.320	0.684	1.265



Verlustbeiwerte $\zeta_{Q\ddot{A}}$ [-] für Querschnittsänderung

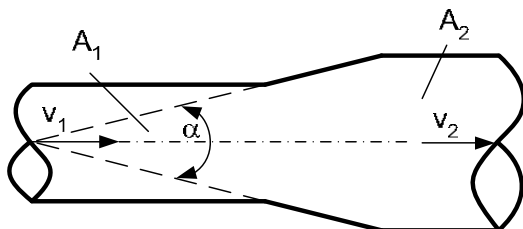


Bild 4-10: Querschnittsänderung [38]

$$\zeta_{Q\ddot{A}} = c \times \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad [-]$$

$\zeta_{Q\ddot{A}}$	Verlustbeiwert für Querschnittsänderungen	[-]
c	Formbeiwert	[-]
$\frac{A_2}{A_1}$	Flächenverhältnis Austritts- zu Eingangsrohrquer-schnitt	[-]

Tabelle 4-17: Formbeiwerte für Querschnittsänderungen nach [38], [40]

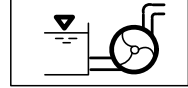
Beschreibung	Aufweitungs-/ Verengungswinkel α [°]	Formbeiwert c [-]
konische Erweiterung	8	0.15 – 0.20
plötzliche Erweiterung	≥ 30	1.00 – 1.20
konische Verengung	≤ 30	vernachlässigbar klein
plötzliche Verengung	≥ 30	0.40 – 0.50

Austrittsverlust ζ_A [-]

Bei Austritt an die Luft ist der Austrittsverlust ζ_A gleich null.

Für die Ermittlung der örtlichen Verlusthöhen werden folgende Fließgeschwindigkeiten eingesetzt:

- für Eintrittsverluste ζ_E Becken-Rohr die Geschwindigkeit v_2 im Rohr
- für Richtungsänderungsverluste ζ_{KK} und ζ_K die Geschwindigkeit v_2 am Krümmer bzw. Knie
- für Querschnittsänderungsverluste $\zeta_{Q\ddot{A}}$ die Geschwindigkeit v_2 direkt hinter der Querschnittsänderung



Manometrische Förderhöhe der Pumpe

Die manometrische Förderhöhe dient zur Dimensionierung der Pumpenleistung. Sie beinhaltet die Gesamtförderhöhe, welche die Pumpe im Saug- und Druckleitungsbereich überwinden muss. Hierzu ist es erforderlich, zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Pumpe mit Saugleitung, d.h. die Pumpe ist über dem tiefsten Wasserspiegel aufgestellt (Bild 4-11)
2. Pumpe ohne Saugleitung mit Zulaufdruck, d.h. die Pumpe ist unter dem tiefsten Wasserspiegel aufgestellt (Bild 4-12).

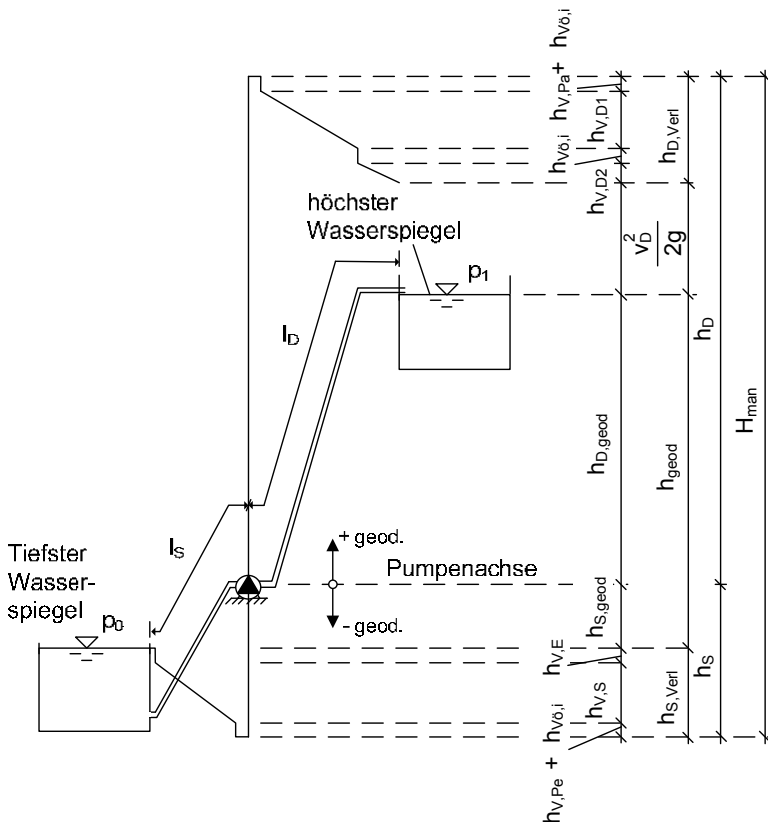
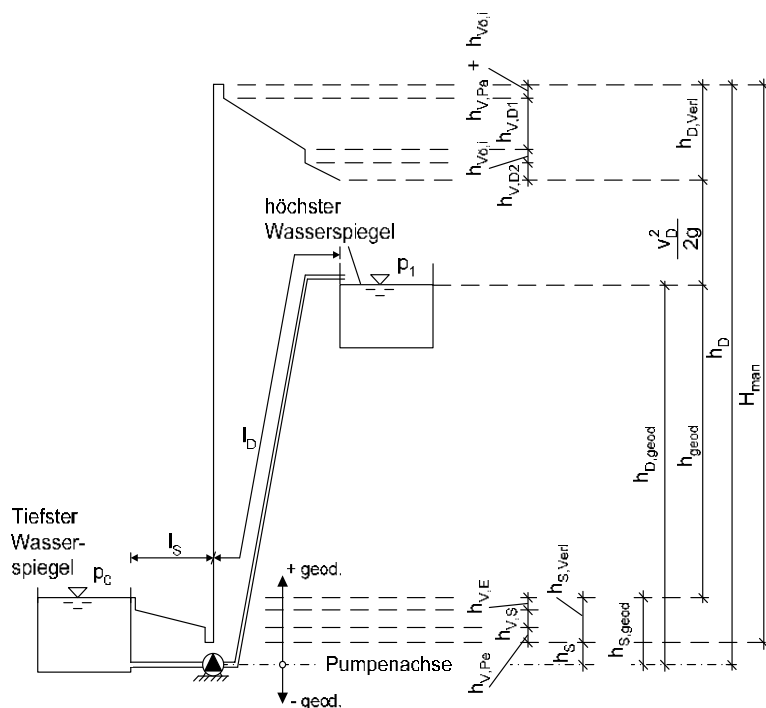
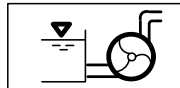


Bild 4-11: Prinzipdrucklinie Fall 1 – Pumpe mit Saugleitung

Flüssigkeitsförderung



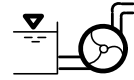
$h_{S,Verl}$	Hydraulische Verlusthöhe an der Saugseite	[m]
$h_{D,Verl}$	Hydraulische Verlusthöhe an der Druckseite	[m]
h_S	Hydraulische Höhe an der Saugseite	[m]
h_D	Hydraulische Höhe an der Druckseite	[m]

Bild 4-12: Prinzipdrucklinie Fall 2 – Pumpe mit Zulaufdruck

Durchflussmenge Q [m³/s]

$Q = v_S \times A_S = v_D \times A_D$		[m ³ /s]
Q	Fördermenge der Pumpe (Q_{FF} bei Feststoff-Flüssigkeitsförderung, Q_F bei Flüssigkeitsförderung)	[m ³ /s]
A_S	Querschnitt der Saugleitung	[m ²]
A_D	Querschnitt der Druckleitung	[m ²]
v_S	Fliessgeschwindigkeit in der Saugleitung	[m/s]
v_D	Fliessgeschwindigkeit in der Druckleitung	[m/s]

Flüssigkeitsförderung



Manometrische Förderhöhe H_{man} [m]

$$H_{\text{man}} = h_{\text{S}} + h_{\text{D}} \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{D}} = h_{\text{D,verl}} + h_{\text{D,geod}} \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{S}} = h_{\text{S,verl}} + h_{\text{S,geod}} \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{geod}} = h_{\text{D,geod}} \pm h_{\text{S,geod}} \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{V,A}} = \frac{v_{\text{D}}^2}{2 \times g} \quad [\text{m}]$$

H_{man} Manometrische Förderhöhe der Pumpe [m]

h_{S} Hydraulische Höhe an der Saugseite [m]

h_{D} Hydraulische Höhe an der Druckseite [m]

Fall 1:

$$\begin{aligned} H_{\text{man}} &= h_{\text{V,E}} + h_{\text{V,S}} + h_{\text{V,Pe}} + h_{\text{S,geod}} + h_{\text{D,geod}} + h_{\text{V,Pa}} + h_{\text{V,D}} + \\ &\quad + h_{\text{V,A}} + \sum_i h_{\text{Vö,i}} \\ &= h_{\text{geod}} + h_{\text{V,S}}(l_{\text{S}}, k, \text{Re}) + h_{\text{V,D}}(l_{\text{D}}, k, \text{Re}) + \frac{v_{\text{S}}^2}{2 \times g} \left(\zeta_{\text{E}} + \zeta_{\text{Pe}} + \sum_i \zeta_{\text{Si}} \right) \\ &\quad + \frac{v_{\text{D}}^2}{2 \times g} \left(1 + \zeta_{\text{Pa}} + \sum_i \zeta_{\text{Di}} \right) \end{aligned} \quad [\text{m}]$$

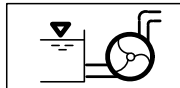
$$h_{\text{geod}} = h_{\text{D,geod}} + h_{\text{S,geod}} \quad [\text{m}]$$

Fall 2:

$$\begin{aligned} H_{\text{man}} &= h_{\text{V,E}} + h_{\text{V,S}} + h_{\text{V,Pe}} + h_{\text{geod}} + h_{\text{V,Pa}} + h_{\text{V,D}} + h_{\text{V,A}} + \\ &\quad + \sum_i h_{\text{Vö,i}} \\ &= h_{\text{geod}} + h_{\text{V,S}}(l_{\text{S}}, k, \text{Re}) + h_{\text{V,D}}(l_{\text{D}}, k, \text{Re}) + \frac{v_{\text{S}}^2}{2 \times g} \left(\zeta_{\text{E}} + \zeta_{\text{Pe}} + \sum_i \zeta_{\text{Si}} \right) \\ &\quad + \frac{v_{\text{D}}^2}{2 \times g} \left(1 + \zeta_{\text{Pa}} + \sum_i \zeta_{\text{Di}} \right) \end{aligned} \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{geod}} = h_{\text{D,geod}} - h_{\text{S,geod}} \quad [\text{m}]$$

Flüssigkeitsförderung



$h_{V,E}$	Druckhöhenverlust beim Übergang Saugbecken zu Saugleitung	[m]
$h_{V,S}$	Reibungshöhenverlust entlang der Saugleitung	[m]
$h_{V,Pe}$	Einlaufverlust an der Pumpe	[m]
$h_{S,geod}$	Geodätische Saughöhe – Höhendifferenz zwischen tiefstem Wasserspiegel und Pumpenachse	[m]
$h_{D,geod}$	Geodätische Druckhöhe – Höhendifferenz zwischen Pumpenachse und höchstem Wasserspiegel	[m]
$h_{V,Pa}$	Auslaufverlust an der Pumpe	[m]
h_{geod}	Gesamtgeodätische Höhe = Geodätische Saug- und Druckhöhe	[m]
$h_{V,D}$	Reibungshöhenverlust entlang der Druckleitung	[m]
$h_{V,A}$	Geschwindigkeitshöhe am Auslauf in Abhängigkeit von der Auslaufgeschwindigkeit	[m]
$h_{V\delta,i}$	Lokale Verluste in der Leitung (durch Krümmer etc.)	[m]
l_S	Länge der Saugleitung	[m]
l_D	Länge der Druckleitung	[m]
v_S	Fliessgeschwindigkeit auf der Saugseite	[m/s]
v_D	Fliessgeschwindigkeit auf der Druckseite	[m/s]
k	Rauigkeitswert für Rohre	[mm]
Re	Reynoldszahl	[-]
ζ_E	Einlaufverlustbeiwert vom Becken in die Saugleitung	[-]
ζ_{Pe}	Einlaufverlustbeiwert an der Pumpe	[-]
ζ_{Pa}	Auslaufverlustbeiwert an der Pumpe	[-]
$\sum_i \zeta_{Di}$	Summe der Verlustbeiwerte für Einbauten, Querschnittsänderungen an den Punkten i der Rohrleitung auf der Druckseite	[-]
$\sum_i \zeta_{Si}$	Summe der Verlustbeiwerte für Einbauten, Querschnittsänderungen an den Punkten i der Rohrleitung auf der Saugseite	[-]

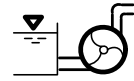
Im Fall eines nicht freien Austritts ist der Druck am Ende der Leitung nicht null. In diesem Fall muss in obiger Gleichung die

Druckhöhe $h_{D,A} = \frac{p_{D,A}}{\gamma_F}$ berücksichtigt werden.

Steht die Zulaufseite einer Pumpe unter Druck, wie z.B. die Druckkammer eines Hydroschildes, so erhöht sich die Zulaufhöhe zur Pumpen-

achse um $h_{S,E} = \frac{p_{S,E}}{\gamma_F}$. Allerdings wird man oft den Zulaufdruck einer

Flüssigkeitsförderung



Druckkammer zur sicheren Leistungsdimensionierung nicht berücksichtigen, um im Notfall bei Abfallen des Drucks auch die drucklose Kammer auszupumpen.

γ_F spezifisches Gewicht der Flüssigkeit [kN/m³]

Flüssigkeits-Feststoff-Gemische

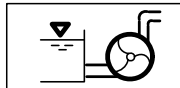
Handelt es sich bei dem Fördermedium nicht um Wasser sondern um ein Flüssigkeits-Feststoff-Gemisch, so ist die Dichte höher:

$$\rho_{FF} = \frac{\mu_{FF}}{100} \times \rho_0 + \left(1 - \frac{\mu_{FF}}{100}\right) \rho_F \quad [t/m^3]$$

$$\mu_{FF} = \frac{V_0}{V_F} \times 100 = \frac{Q_0}{Q_F} \times 100 = \frac{\rho_{FF} - \rho_F}{\rho_0 - \rho_F} \times 100 \quad [Vol.\%]$$

ρ_{FF}	Rohdichte des Flüssigkeits-Feststoff-Gemischs	[t/m ³]
μ_{FF}	Feststoff-Förderflüssigkeits-Volumenkonzentration	[Vol.-%]
V_0	Feststoffvolumen	[fm ³]
V_F	Volumen der unbeladenen Förderflüssigkeit	[m ³]
Q_0	Feststofffördermenge (Grundabbauleistung)	[fm ³ /h]
Q_F	Fördermenge der unbeladenen Förderflüssigkeit	[m ³ /h]
ρ_0	Rohdichte des Feststoffs über Wasser (natürliche Lagerung ohne Auftrieb)	[t/m ³]
ρ_F	Rohdichte der Förderflüssigkeit ohne Feststoffe (Wasser $\rho_F = 1$; Bentonitsuspension siehe Bild 4-13)	[t/m ³]
ρ_W	Rohdichte von Wasser	[t/m ³]

Die Grenzgrösse $\rho_{FF} = 1.4 - 1.5 \text{ t/m}^3$ ist bei Kreispumpen zu beachten.



Manometrische Förderhöhe $H_{\text{man}}^{\text{FF}}$ [m] bei Flüssigkeits-Feststoff-Gemischen

$$H_{\text{man}}^{\text{FF}} = H_{\text{man}} \times \left(\frac{\rho_{\text{FF}}}{\rho_{\text{W}}} \right) \quad [\text{m}]$$

Dichte von Förderflüssigkeiten

Im Baubetrieb werden als Fördermedium neben Wasser $\rho_{\text{F}} = \rho_{\text{W}} = 1.0 \text{ t/m}^3$ auch Bentonitsuspensionen verwendet, so z.B. bei Hydroschilden (Bild 4-13).

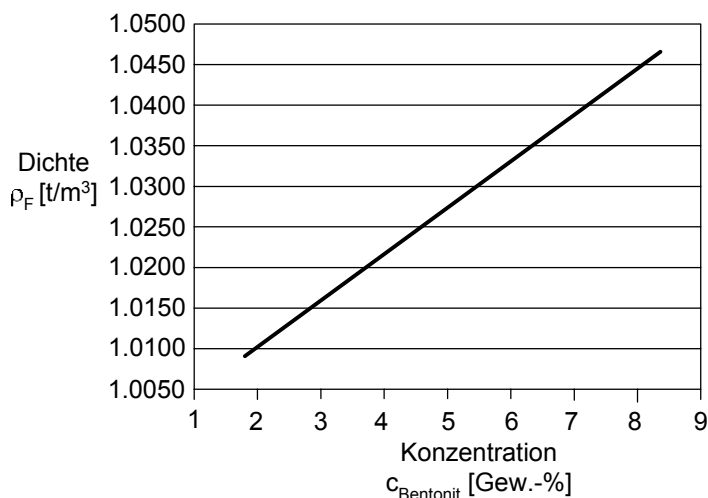
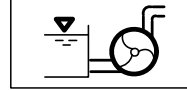


Bild 4-13: Dichteverlauf der Bentonitsuspension bei verschiedenen Bentonit-Wasser-Konzentrationen [41]



Kreiselpumpen: Überprüfung der Pumpeinrichtung

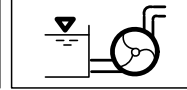
Erforderliche Saughöhe der Pumpe $h_{S,erf}$ [m]

$h_{S,erf} = \left(h_{S,geod} + h_{S,Verl} + \frac{v_S^2}{2 \times g} \right) \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_w} \quad [m]$		
$h_{S,erf}$	erforderliche Saughöhe	[m]
$h_{S,geod}$	geodätische Saughöhe (entspricht der Höhendifferenz Unterwasserspiegel – Pumpenachse)	[m]
$h_{S,Verl}$	Gesamtverlust der Saugleitung (Reibungsverluste über Saugleitungslänge, Krümmung, Querschnittsänderung, Einbauten etc.)	[m]
$\frac{v_S^2}{2 \times g}$	Geschwindigkeitshöhe in der Saugleitung	[m]
ρ_{FF}	Rohdichte des Feststoff-Förderflüssigkeits-Gemischs	[t/m ³]
ρ_w	Rohdichte von Wasser	[t/m ³]

Die erforderliche Saughöhe $h_{S,erf}$ muss mit den Herstellerangaben $h_{S,Gerät}$ (aus der Pumpenkennlinie für die Saughöhe) verglichen werden. Es muss gelten:

$$h_{S,erf} \leq h_{S,Gerät}$$

Der Atmosphärendruck (10.33 m Wassersäule bei N.N.) stellt die physikalisch bedingte Grenze der idealen Saughöhe bei einem absoluten Vakuum am Saugstutzen der Pumpe dar. Die Kreiselpumpe baut am Saugstutzen einen technischen Unterdruck gegenüber dem Atmosphärendruck auf. Dieser Druckunterschied entspricht der maximalen technisch erreichbaren Saughöhe $h_{S,max} = h_{S,Gerät}$ und liegt je nach Qualität der Kreiselpumpe sowie Temperatur des Mediums und Drehzahl zwischen 6 und 9 mWs [42].



Überprüfung auf Kavitation bei Flüssigkeitsförderung

Zulässige Saughöhe $h_{S,zul}$ [m]

$h_{S,zul} = H_B - H_D - \Delta h$		[m]
$h_{S,zul}$	zulässige Saughöhe	[m]
H_B	Aussenatmosphärendruck oder Druck über der Flüssigkeit an der Saugseite	[m]
H_D	Dampfdruck der Flüssigkeit bei der am Pumpeneintritt herrschenden Temperatur	[m]
Δh	temperaturabhängiger Verlust der Saugfähigkeit der Kreiselpumpe, abhängig von der konstruktiven Gestaltung der Pumpe sowie Drehzahl (siehe Unterlagen der Pumpenhersteller)	[m]

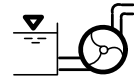
Für kavitationsfreie Strömungen muss gelten:

$$h_{S,erf} \leq h_{S,zul} = h_{S,Gerät}$$

Tabelle 4-18: Dampfdruck von Wasser H_D [m] nach [43]

Temperatur [°C]	Dampfdruck im Sättigungszustand H_D [m]
5	0.0889
10	0.1251
20	0.2383
30	0.4325
40	0.7520
60	2.0310
80	4.8290

Angaben zur Ermittlung von Δh können maschinenspezifisch aus [42] entnommen werden.



Überprüfung der notwendigen Fließgeschwindigkeit für Feststofftransport [44]

Für den Transport von Feststoffen in einer Förderflüssigkeit müssen die zu fördernden Teilchen in einem schwebenden Zustand gehalten werden. Dies geschieht unter der Beachtung der **kritischen Fließgeschwindigkeit v_{krit} [m/s] für einen schwebenden Transport:**

$v_{krit} = Fr_{krit} \times \sqrt{2 \times g \times d \times \frac{\rho_0 - \rho_F}{\rho_F}}$		[m/s]
Bedingung in den Saug- und Förderleitungen: $(v_S; v_D) > v_{krit}$		[m/s]
v_{krit}	kritische Fließgeschwindigkeit für schwebenden Transport, um Absetzungen zu vermeiden	[m/s]
Fr_{krit}	Froud'sche Zahl für die kritische Geschwindigkeit	[-]
g	Erdbeschleunigung: 9.81	[m/s ²]
d	Rohrdurchmesser	[m]
ρ_0	Rohdichte des Feststoffs (ohne Porenraum)	[t/m ³]
ρ_F	Rohdichte der Förderflüssigkeit	[t/m ³]
v_S	Fließgeschwindigkeit in der Saugleitung	[m/s]
v_D	Fließgeschwindigkeit in der Druckleitung	[m/s]

Die kritische Froud'sche Zahl Fr_{krit} ist abhängig von der Feststoff-Förderflüssigkeits-Volumenkonzentration μ_{FF} [Vol.-%] des Förderflüssigkeit-Feststoff-Korngemischs und dem mittleren Korndurchmesser d_m [mm] des zu transportierenden Korngemischs:

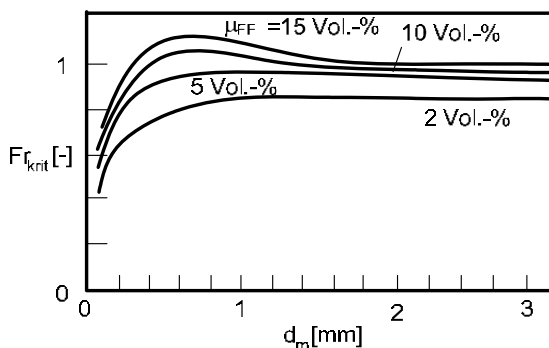
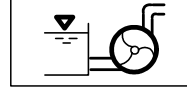


Bild 4-14: Abhängigkeit der Froud'schen Zahl Fr_{krit} vom mittleren Korndurchmesser d_m und der Feststoff-Förderflüssigkeits-Volumenkonzentration μ_{FF} des zu transportierenden Korngemischs nach [44]

Flüssigkeitsförderung



Beispiel: Tunnelvortrieb mit Hydroschild

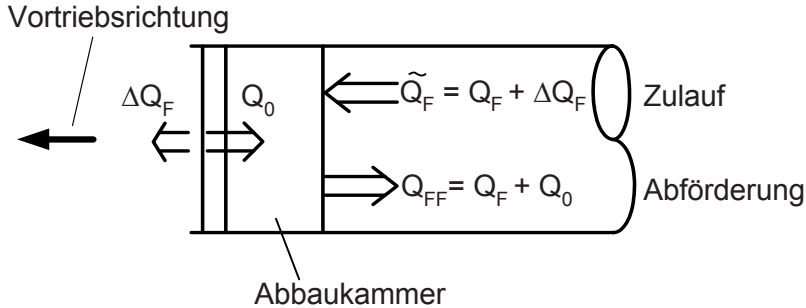


Bild 4-15: Materialfluss bei Hydroschildvortrieb

Das Feststoffvolumen entspricht der Grundabbauleistung:

$$Q_0 = l \times A_{Ob} \quad [m^3/h]$$

bzw.

$$V_{FS} = V_{ab} = A_{Ob} \times \Delta l_{ab} \quad [m^3]$$

Annahme: Die Förderzeit entspricht der Abbauezeit ($t_{FZ} = t_{BZ}$):

$$Q_0 = \frac{V_{ab}}{t_{BZ}} \quad [m^3/h]$$

Für das geschlossene System des Zu- und Ablaufs gilt die Kontinuitätsgleichung:

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_i \rho_i \times Q_i = 0$$

Beim Zulauf des Systems handelt es sich um eine Flüssigkeit, so dass die Dichte bei allen Komponenten gleich ist:

Zulauf:

$$\rho_F \times \tilde{Q}_F = \rho_F \times Q_F + \rho_F \times \Delta Q_F \quad [kg/h]$$

$$\tilde{Q}_F = Q_F + \Delta Q_F \quad [m^3/h]$$

$$\Delta Q_F = Q_F \times \frac{\kappa_{Verl}}{100} \quad [m^3/h]$$

Flüssigkeitsförderung



Abförderung:

$$\rho_{FF} \times Q_{FF} = \rho_0 \times Q_0 + \rho_F \times Q_F \quad [\text{kg/h}]$$

$$\text{mit } \mu_{FF} = \frac{\rho_0 \times Q_0}{\rho_F \times Q_F} \times 100 \quad [\text{Masse-\%}]$$

$$Q_{FF} = Q_F \times \frac{\rho_F}{\rho_{FF}} \times \left(\frac{\mu_{FF}}{100} + 1 \right) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

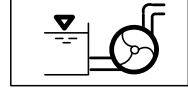
$$Q_0 = Q_{FF} \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_0} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\mu_{FF}}} \right) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

In der Praxis sind die Dichtenunterschiede zwischen der eingebrachten Flüssigkeit und des Flüssigkeits-Feststoff-Gemischs oft gering. Somit kann der Volumenstrom vereinfacht berechnet werden:

$$Q_{FF} = Q_F \times \left(\frac{\mu_{FF}}{100} + 1 \right) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Q_0	Feststofffördermenge (Grundabbauleistung)	$[\text{m}^3/\text{h}]$
ρ_0	Dichte des Feststoffs	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
I	Penetrationsleistung	$[\text{m}/\text{h}]$
A_{Ob}	Ortsbrustquerschnitt	$[\text{m}^2]$
V_{FS}	Abbauvolumen (V_{ab}) während eines Vortriebshubs (ΔI_{ab})	$[\text{m}^3]$
V_{ab}	Abbauvolumen	$[\text{m}^3]$
ΔI_{ab}	Vortriebshub	$[\text{m}]$
t_{FZ}	Förder- bzw. Abbauphase (t_{BZ}) beim Druckschild (Erddruck- bzw. Hydroschild)	$[\text{h}]$
t_{BZ}	Abbauphase	$[\text{h}]$
$\tilde{Q}_F$	Zulaufmenge der Trägerflüssigkeit (Bentonitsuspension)	$[\text{m}^3/\text{h}]$
ρ_F	Dichte der Trägerflüssigkeit im Zulauf	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
Q_F	Trägerflüssigkeitsmenge der unbeladenen Förderflüssigkeit (z.B. Bentonitsuspension) in der Abförderung	$[\text{m}^3/\text{h}]$
ΔQ_F	Förderflüssigkeitsverlust im Porenraum der Ortsbrust	$[\text{m}^3/\text{h}]$
K_{Verl}	Verlustanteil der Trägerflüssigkeit im Porenraum an	$[\text{Vol.-%}]$

Flüssigkeitsförderung



	der Ortsbrust (5 – 20 %)	
Q_{FF}	Flüssigkeits-Feststoff-Förderleistung (Abförderung)	$[m^3/h]$
ρ_{FF}	Dichte des Flüssigkeits-Feststoffs-Gemisch (Abförderung)	$[kg/m^3]$
μ_{FF}	Feststoff-Förderflüssigkeits-Volumenkonzentration	$[Vol.-%]$
η	Wirkungsgrad der Pumpe	$[-]$

Kreiselpumpen besitzen **Pumpenkennlinien**, auch Drosselkurven genannt. Die Form der Pumpenkennlinien ist abhängig von Bauart und Umdrehungszahl. Die Pumpenkennlinien und die Rohrkenlinien werden in einem H-Q-Diagramm dargestellt.

Der Schnittpunkt Rohr- und Pumpkennlinie ergibt den Betriebspunkt der Pumpe. Es kann somit die erreichbare Fördermenge Q ermittelt werden.

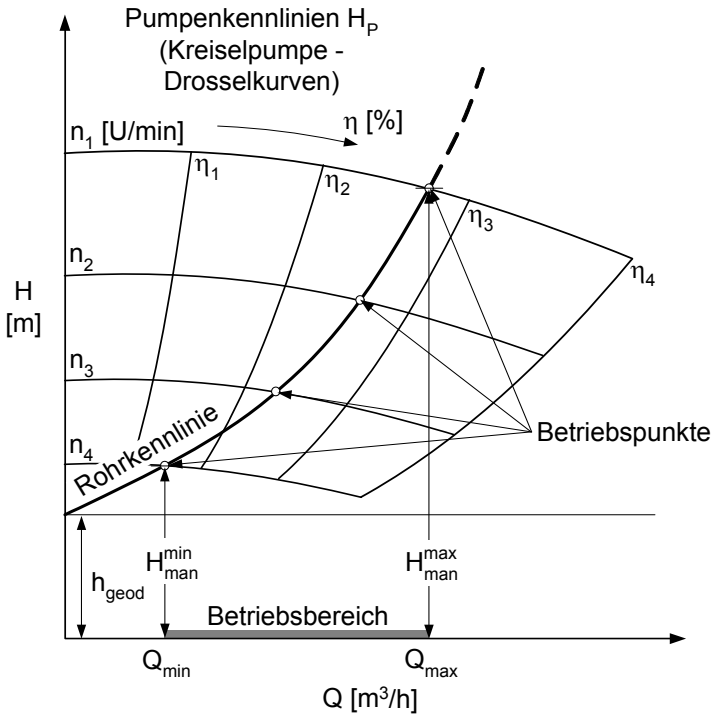
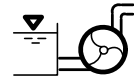


Bild 4-16: H-Q-Diagramm für Pumpen- und Rohrkenlinien

Flüssigkeitsförderung



Auswahl der Kreiselpumpe

$$\begin{pmatrix} Q^{\max} \\ H_{\text{man}} \\ h_{\text{S,erf}} \end{pmatrix} \Rightarrow \left(\begin{array}{l} \text{Entsprechende Pumpe} \\ \text{bzw. Pumpenkennlinie,} \\ \text{in der alle drei Bedingungen} \\ \text{erfüllt sind} \end{array} \right) \Rightarrow \begin{pmatrix} n \\ \eta \end{pmatrix} \Rightarrow P_P = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta} \quad [\text{kW}]$$

$Q^{\max}$	Fördermenge (Q_{FF} bei Flüssigkeits-Feststoff-Gemisch; Q_{F} bei reiner Flüssigkeitsförderung)	$[\text{m}^3/\text{h}]$
H_{man}	erforderliche manometrische Förderhöhe	$[\text{m}]$
$h_{\text{S,erf}}$	erforderliche Saughöhe	$[\text{m}]$
n	Drehzahl der Pumpe	$[\text{U}/\text{min}]$
η	Gesamtwirkungsgrad der Pumpanlage	$[-]$
P_P	Pumpenleistung/Anschlussleistung	$[\text{kW}]$
P_{erf}	erforderliche Grundleistung der Pumpe	$[\text{kW}]$

Leistungsaufnahme der Pumpe P_P [kW]

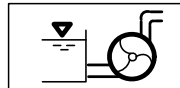
$$P_P = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta} \quad [\text{kW}]$$

Erforderliche Grundleistung der Kreiselpumpe P_{erf} [kW]

$$P_{\text{erf}} = \frac{\rho \times g \times Q^{\max} \times H_{\text{man}}}{3600} \quad [\text{kW}]$$

P_{erf}	erforderliche Grundleistung der Pumpe	$[\text{kW}]$
η	Gesamtwirkungsgrad der Pumpanlage	$[-]$
ρ	Dichte des Fördermediums (ρ_{FF} Rohdichte des Flüssigkeits-Feststoff-Gemischs; ρ_{F} Rohdichte der Förderflüssigkeit ohne Feststoffe)	$[\text{t}/\text{m}^3]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{m}/\text{s}^2]$
$Q^{\max}$	Fördermenge (Q_{FF} bei Flüssigkeits-Feststoff-Gemisch; Q_{F} bei reiner Flüssigkeitsförderung)	$[\text{m}^3/\text{h}]$
H_{man}	erforderliche Förderhöhe	$[\text{m}]$

Flüssigkeitsförderung



Falls die Wirkungsgrade η nicht im Pumpendiagramm angegeben sind, können die Wirkungsgradfaktoren Tabelle 4-19 entnommen werden. Der **Gesamtwirkungsgrad der Pumpanlage** η [-] ergibt sich dann aus:

$$\eta = \eta_P \times \eta_K \times \eta_M$$

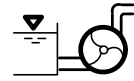
[-]

η	Gesamtwirkungsgrad der Pumpanlage	[-]
η_P	Wirkungsgrad der Pumpe	[-]
η_K	Wirkungsgrad der Kupplung	[-]
η_M	Wirkungsgrad des Pumpenantriebs/-motors	[-]

Tabelle 4-19: Wirkungsgrade nach [45], [46]

Pumpen-Wirkungsgrad η_P	[-]	0.60 – 0.80
Kupplungs-Wirkungsgrad η_K	[-]	0.95 – 0.99
Motor-Wirkungsgrad η_M	[-]	0.75 – 0.94

Flüssigkeitsförderung



Drehzahlregelung von Kreiselpumpen (Ähnlichkeitsgesetz) [42]

Für die Regelung von Kreiselpumpen mittels Drehzahländerung gilt folgender Zusammenhang für zwei verschiedene Gleichgewichtszustände der Rohr- und Pumpenkennlinien:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad [-]$$
$$\frac{H_{P1}}{H_{P2}} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad [-]$$

Q_i	Fördermenge	$[m^3/h]$
n_i	Drehzahl der Pumpe	$[U/min]$
$H_{P,i}$	Förderhöhe	$[m]$
i	Drehzahlstufen: $i = (1; 2)$	$[-]$

Die Fördermenge Q_i ändert sich proportional zur Drehzahl n_i . Die Förderhöhe $H_{P,i}$ ändert sich proportional zum Quadrat der Drehzahl n_i .

Unter Annahme des gleichen Wirkungsgrads für kleine Drehzahländerungen Δn_i ergibt sich für die Pumpleistung P_{Pi} folgendes Verhältnis:

$$\frac{P_{P1}}{P_{P2}} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad [-]$$

Bei grösseren Veränderungen der Drehzahl muss die Veränderung des Wirkungsgrads η berücksichtigt werden. Es gilt

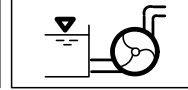
$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \times \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{0.1} \quad [-]$$

Kolbenpumpen:

Dimensionierung und Überprüfung der Pumpeinrichtung

Kolbenpumpen wirken durch das Verdrängungsprinzip. Förderhöhe, Förderleistung und Verluste in der Rohrleitung sind somit voneinander unabhängig.

Flüssigkeitsförderung



Förderleistung Q [m^3/h] nach [21]

$$Q = 6 \times \lambda \times A_{\text{Kolben}} \times s \times n \times n_{\text{Kolben}} \times 10^{-5} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Q	Fördermenge	$[\text{m}^3/\text{h}]$
λ	volumetrischer Wirkungsgrad	$[-]$
A_{Kolben}	Kolbenfläche	$[\text{cm}^2]$
s	Kolbenweg	$[\text{cm}/\text{U}]$
n	Umdrehungszahl der Kurbelwelle	$[\text{U}/\text{min}]$
n_{Kolben}	Zylinder- bzw. Kolbenanzahl	$[-]$

Der volumetrische Wirkungsgrad λ kann mit ca. 0.98 – 0.99 angegeben werden.

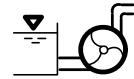
Überprüfung der zulässigen Saughöhe

Die zulässigen Saughöhen von Kolbenpumpen sind von physikalischen Vorgängen im Zylinder abhängig. Die maximale Saughöhe ist erreicht, wenn die Saugspannung im Zylinder so gross ist, dass Dampfbildung (Kavitation) auftritt.

Tabelle 4-20: Zulässige Saughöhen $h_{\text{S,zul}}$ bei Aussenatmosphärendruck (H_{B}) von 10 m Wassersäule [45]

Wassertemperatur [°C]	5	10	20	30	40	60	80
Saughöhe $h_{\text{S,zul}}$ [m]	7.00	6.97	6.85	6.66	6.34	5.07	2.27

Flüssigkeitsförderung



Leistungsaufnahme der Pumpe [kW]

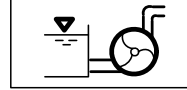
$$P_P = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta} \quad [\text{kW}]$$

$$\eta = \eta_P \times \eta_K \times \eta_M \quad [-]$$

Erforderliche Grundleistung der Kolbenpumpe P_{erf} [kW] nach [21]

$$P_{\text{erf}} = \frac{\rho \times g \times \lambda \times A_{\text{Kolben}} \times s \times n \times n_{\text{Kolben}} \times H_{\text{man}}}{6 \times 10^{-7}} \quad [\text{kW}]$$

P_P	Pumpenleistung/Anschlussleistung	[kW]
P_{erf}	erforderliche Grundleistung der Pumpe	[kW]
η	Gesamtwirkungsgrad der Pumpanlage	[-]
η_P	Wirkungsgrad der Pumpe	[-]
η_K	Wirkungsgrad der Kupplung	[-]
η_M	Wirkungsgrad des Pumpenantriebs/-motors	[-]
ρ	Dichte des Fördermediums	[t/m ³]
g	Erdbeschleunigung: 9.81	[m/s ²]
λ	volumetrischer Wirkungsgrad	[-]
A_{Kolben}	Kolbenfläche	[cm ²]
s	Kolbenweg	[cm/U]
n	Umdrehungszahl der Kurbelwelle	[U/min]
n_{Kolben}	Zylinder- bzw. Kolbenanzahl	[-]
H_{man}	erforderliche manometrische Förderhöhe	[m]



Beispiel einer Pumpenberechnung

Es wird eine Pumpeneinrichtung für den Feststofftransport einer Tunnelbohrmaschine mit Hydroschild sowie Bentonit als Trägermedium betrachtet. Die Förderung des abgebauten Materials erfolgt über die Länge des Vortriebs in einer horizontalen Leitung bis zum Schacht, von dort führt die Förderleitung vertikal in eine Separationsanlage. Bild 4-17 enthält die massgebenden Abmessungen. Für die Steuerung des Pumpenbetriebs sind Zusammenhänge zwischen Vortriebsleistung und Pumpeneinrichtung darzustellen.

Angaben:

Rohrlänge (Saugleitung):	$l_S =$	15 m
Maximale Rohrlänge (Druckleitung):	$l_D =$	500 m
Geodätische Höhendifferenz:	$h_{\text{geod}} =$	40 m
Rohrtyp:		geschweisstes Stahlrohr
Rohrdurchmesser:	$d = d_S = d_D =$	40 cm
Einbauten:		Einlauftrumpete Rohrbogen, 3 Stück
Bentonitkonzentration:	$C_{\text{Bentonit}} =$	8 Gew.-%
Mittlerer Korndurchmesser Abbaumaterial:	$d_m =$	3 mm
Rohdichte des Feststoffs:	$\rho_0 =$	2.7 t/m ³
Druck im Hydroschild:	$p_{0,\text{ein}} =$	2.0 kPa
Maximale Abbauleistung:	$Q_0 =$	130 fm ³ /h

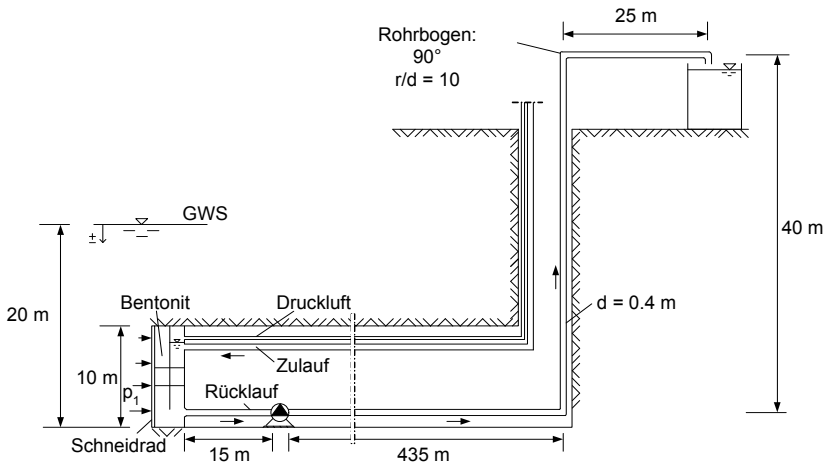
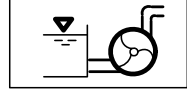


Bild 4-17: Schematische Darstellung eines Rechenbeispiels



Vorüberlegungen:

Zunächst ist die Darstellung der Drucklinie der Pumpeneinrichtung (Bild 4-18) erforderlich. Sie zeigt die möglichen Verluste innerhalb der Rohrleitung und kennzeichnet diese Verluste. Die Pumpenbemessung erfolgt ohne Berücksichtigung des „unterstützenden“ Zulaufdrucks auf der Saugseite der Pumpe; dieser wird als Sicherheit betrachtet (Dimensionierung der Pumpe mit $p_{0,\text{ein}} = 0 \text{ kPa}$).

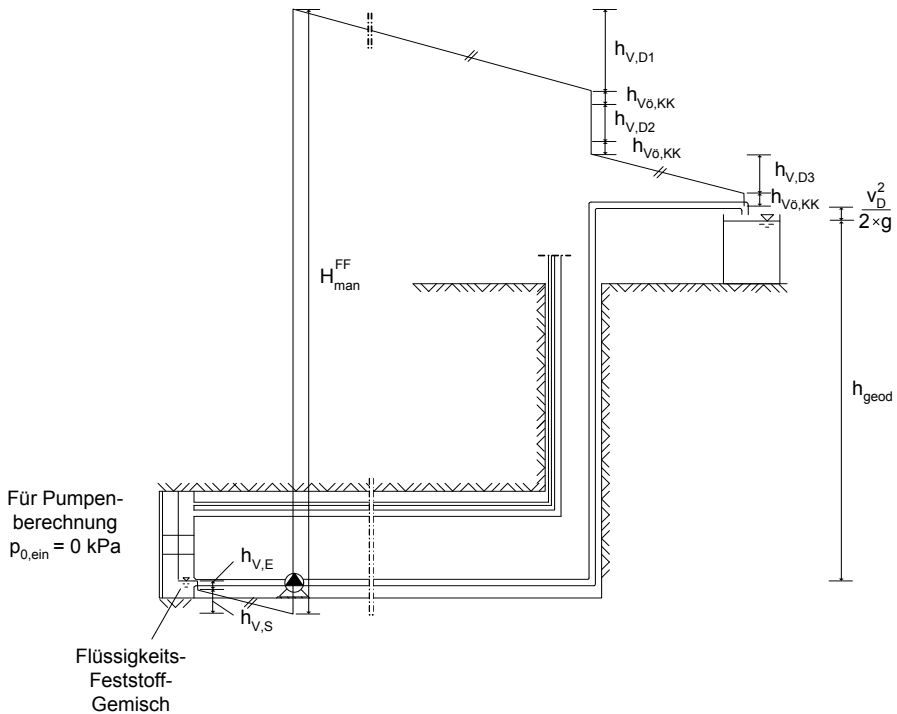
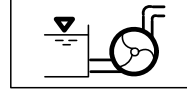


Bild 4-18: Schematische Darstellung der Drucklinie



Zur Dimensionierung der Pumpe werden zwei Fälle des Pumpenbetriebs betrachtet.

Fall 1: Optimale Feststoff-Flüssigkeits-Volumenkonzentration:

$$\mu_{FF} = 6.5 \text{ Vol.-%}$$

$$\begin{aligned} \rho_{FF} &= \frac{\mu_{FF}}{100} \times \rho_0 + \left(1 - \frac{\mu_{FF}}{100}\right) \times \rho_F = \\ &= \frac{6.5}{100} \times 2.7 + \left(1 - \frac{6.5}{100}\right) \times 1.045 = 1.15 \text{ [t/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Fall 2: Grenzfälle der Flüssigkeits-Feststoff-Förderung:

- Bentonitsuspension ohne Beladung

$$\mu_{FF} = 0 \text{ Vol.-%}$$

$$c_{\text{Bentonit}} = 8 \text{ Gew.-%} \Rightarrow \rho_{FF} = 1.045 \text{ t/m}^3 \text{ (Bild 4-13)}$$

- Grenzgrösse für den Betrieb von Kreiselpumpen

$$\rho_{FF} = 1.4 \text{ t/m}^3$$

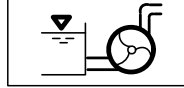
$$\mu_{FF} = \frac{\rho_{FF} - \rho_F}{\rho_0 - \rho_F} \times 100 = \frac{1.4 - 1.045}{2.7 - 1.045} \times 100 \approx 21 \text{ Vol.-%}$$

Lösung - Fall 1:

$$\mu_{FF} = 6.5 \text{ Vol.-% und } \rho_{FF} = 1.15 \text{ t/m}^3$$

Ziel der Berechnung ist die Ermittlung der Rohrkenmlinie des Systems. Hierzu werden zunächst einige diskrete Verlusthöhen in Abhängigkeit der Fördermenge bzw. Fördergeschwindigkeit im betrachteten Leistungsbereich berechnet. Die Addition dieser Werte mit der geodätischen Förderhöhe ergibt die für die Bemessung der Pumpe massgebende Rohrkenmlinie (Bild 4-19). Zusätzlich erfolgt eine Überprüfung der Bedingungen für den Feststofftransport. Im Folgenden sind die Formeln für die Ermittlung der manometrischen Förderhöhen angegeben. In Tabelle 4-21 sind die entsprechenden Werte für verschiedene Fördermengen zusammengefasst.

Flüssigkeitsförderung



- Dichte der Bentonitsuspension:
 $c_{\text{Bentonit}} = 8 \text{ Gew.-%} \Rightarrow \rho_F = 1.045 \text{ t/m}^3 \text{ (Bild 4-13)}$
- Maximal erforderliche Förderleistungen bei voller Abbauleistung:
 Abförderung:

Feststoffmenge: $Q_0 = 130 \text{ fm}^3/\text{h}$

Trägerflüssigkeit (Bentonitsuspension):

$$Q_F = \frac{Q_0}{\mu_{FF}} \times 100 = \frac{130}{6.5} \times 100 = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Flüssigkeits-Feststoff-Gemisch (vereinfachte Formel):

$$Q_{FF} = Q_F + Q_0 = 2000 + 130 = 2130 \text{ m}^3/\text{h}$$

Flüssigkeits-Feststoff-Gemisch (genaue Formel):

$$Q_{FF} = \frac{Q_F \times \rho_F + Q_0 \times \rho_0}{\rho_{FF}} = \frac{2000 \times 1.045 + 130 \times 2.7}{1.15} = 2123 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der Unterschied zwischen genauer und Näherungslösung ist gering.

Zulauf an Bentonitsuspension (Annahme $\kappa_{\text{Verl}} = 10 \text{ \%}$):

$$\tilde{Q}_F = Q_F + \Delta Q = Q_F \times \left(1 + \frac{\kappa_{\text{Verl}}}{100}\right) = 2000 \times \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 2200 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

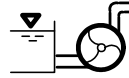
- Fließgeschwindigkeit, hier über die gesamte Strecke gleich bleibend, da $d = \text{const.}$:

$$v = v_D = v_S = \frac{Q_{FF}}{3600 \times A} = \frac{Q_{FF}}{3600 \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2} \text{ [m/s]}$$

- Kritische Fließgeschwindigkeit für Feststofftransport v_{krit} :

$$d_m = 3 \text{ mm} \Rightarrow Fr_{\text{krit}} = 0.92 \text{ (Bild 4-14)}$$

Flüssigkeitsförderung



$$v_{\text{krit}} = Fr_{\text{krit}} \times \sqrt{2 \times g \times d \times \frac{\rho_0 - \rho_F}{\rho_F}}$$

$$= 0.92 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.4 \times \frac{2.7 - 1.045}{1.045}} = 3.24 \text{ m/s}$$

- Bedingung für den Transport von Feststoffen:

$$v \geq v_{\text{krit}}$$

- Kritische Förderleistung für Transport von Feststoffen:

$$Q_{\text{FF}} = v_{\text{krit}} \times A = v_{\text{krit}} \times 3600 \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$= 3.24 \times 3600 \times \pi \times \left(\frac{0.4}{2}\right)^2 = 1466 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dies entspricht einer Abbauleistung von:

$$Q_0 = Q_{\text{FF}} \times \frac{\rho_{\text{FF}}}{\rho_0} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{100}{\mu_{\text{FF}}}} \right) = 1466 \times \frac{1.15}{2.7} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{100}{6.5}} \right) = 38.1 \text{ m}^3/\text{h}$$

bei $\rho_{\text{FF}} = 1.15 \text{ t/m}^3$

- Widerstandsbeiwert λ (für die gesamte Strecke gleich bleibend):

$$\frac{k}{d} = \frac{0.008}{400} = 0.00002 = 2 \times 10^{-5}$$

kinematische Viskosität: $\nu = 1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

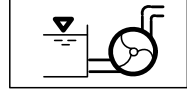
$$\text{Reynoldszahl: } Re = \frac{v \times d}{\nu} \quad [-]$$

$$\lambda = \left[-2 \times \log \left[2.7 \times \frac{(\log Re)^{1.2}}{Re} + \frac{1}{3.71} \times \frac{k}{d} \right] \right]^{-2} \quad [-]$$

- Verluste der Saugleitung:

$$\text{Reibungsverlust: } h_{v,s} = \lambda \times \frac{l_s}{d} \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad [\text{m}]$$

Flüssigkeitsförderung



Einlauffrompete: $h_{V,E} = \zeta_E \times \frac{v^2}{2 \times g}$ [m]

Verluste Saugleitung gesamt: $h_{S,Verl} = (h_{V,S} + h_{V,E}) \times \eta_{visko}$ [m]

- Verluste der Druckleitung:

Reibungsverlust: $h_{V,D} = \lambda \times \frac{l_D}{d} \times \frac{v^2}{2 \times g}$ [m]

Verluste durch drei Rohrbogen: $h_{V\theta,KK} = 3 \times \zeta_{KK} \times \frac{v^2}{2 \times g}$ [m]

Verlust Druckleitung gesamt: $h_{D,Verl} = (h_{V,D} + h_{V\theta,KK}) \times \eta_{visko}$ [m]

- Erforderliche Saughöhe:

Dichte von Wasser: $\rho_W = 1 \text{ t/m}^3$

$h_{S,erf} = \left(h_{S,geod} + h_{S,Verl} + \frac{v^2}{2 \times g} \right) \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_W}$ [m]

hier: $h_{S,geod} \approx 0 \text{ m}$

- Zulässige Saughöhe:

$h_{S,zul} = H_B - H_d - \Delta H = 10 - 0.1251 - 1.5 = 8.37 \text{ m}$

- Erforderliche Förderhöhe H_{man}^{FF} der Pumpe:

$H_{man} = h_{geod} + (h_{S,Verl} + h_{D,Verl}) + \frac{v_D^2}{2 \times g}$ [m]

$H_{man}^{FF} = H_{man} \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_W}$ [m]

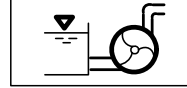
Flüssigkeitsförderung



Tabelle 4-21: Fall 1 – Ermittlung der Rohrkenlinie und Leistungen

Q_{FF} [m³/h]	v [m/s]	$v > v_{krit}$	Re	λ [-]	$h_{v,s}$ [m]	$h_{v,E}$ [m]	$h_{s,vert}$ [m]	$h_{v,D}$ [m]	$h_{v,0,ek}$ [m]	$h_{v,0,vert}$ [m]	$h_{s,ert}$ [m]	$h_{s,ert} < h_{s,zul}$	H_{man} [m]	H_{man}^{FF} [m]	P_{ert} [kW]	η_P [-]	η [-]	P_P [kW]
10	0.02	nein	6.80×10^3	3.43×10^{-2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ja	40.00	46.10	17.6	0.10	0.09	197.4
500	1.11	nein	3.40×10^5	1.44×10^{-2}	0.03	0.00	0.04	1.12	0.021	1.25	0.12	ja	41.36	47.66	81.8	0.40	0.36	229.6
1000	2.21	nein	6.80×10^5	1.28×10^{-2}	0.12	0.01	0.15	3.99	0.082	4.48	0.46	ja	44.88	51.72	159.3	0.63	0.56	283.7
1400	3.09	nein	9.52×10^5	1.22×10^{-2}	0.22	0.03	0.28	7.44	0.161	8.36	0.88	ja	49.13	56.62	236.1	0.71	0.63	373.2
1600	3.54	ja	1.09×10^6	1.20×10^{-2}	0.29	0.04	0.36	9.54	0.21	10.72	1.15	ja	51.71	59.60	281.0	0.72	0.64	438.0
1800	3.98	ja	1.22×10^6	1.18×10^{-2}	0.36	0.05	0.45	11.88	0.266	13.36	1.44	ja	54.61	62.94	331.0	0.73	0.65	508.9
2000	4.42	ja	1.36×10^6	1.16×10^{-2}	0.43	0.06	0.54	14.46	0.329	16.26	1.77	ja	57.80	66.62	386.7	0.75	0.67	578.7
2200	4.86	ja	1.50×10^6	1.15×10^{-2}	0.52	0.07	0.65	17.28	0.398	19.44	2.14	ja	61.30	70.65	448.6	0.76	0.68	662.5
2400	5.31	ja	1.63×10^6	1.13×10^{-2}	0.61	0.09	0.77	20.34	0.473	22.89	2.50	ja	65.09	73.86	509.2	0.76	0.68	752.0

Flüssigkeitsförderung



Aufgrund der kritischen Geschwindigkeit für den Feststofftransport ist eine Förderleistung von 1466 m³/h ($v_{krit} = 3.24$ m/s) einzuhalten. Bedingt durch die gewählte Pumpe beträgt die maximale Förderleistung 2410 m³/h bei $\mu_{FF} = 6.5$ Vol.-% und $\rho_{FF} = 1.15$ t/m³. Durch eine stufenlose Drehzahlregelung ($600 \text{ min}^{-1} < n < 700 \text{ min}^{-1}$) können die entsprechenden Förderleistungen eingestellt werden.

- Erforderliche Grundleistung der Kreiselpumpe:

$$P_{\text{erf}} = \frac{\rho_{FF} \times g \times Q_{FF} \times H_{\text{man}}}{3600} \quad [\text{kW}]$$

- Tatsächliche Leistungsaufnahme der Pumpe:
Der Wirkungsgrad η_P entstammt dem Pumpkennlinien-Diagramm (Bild 4-19). Für die Wirkungsgrade der Kupplung und des Motors werden $\eta_K = 0.99$ und $\eta_M = 0.90$ angenommen.

$$P_P = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta} = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta_P \times \eta_K \times \eta_M} \quad [\text{kW}]$$

Lösung – Fall 2:

$$\begin{aligned} 0 \text{ Vol.-%} &< \mu_{FF} < 21 \text{ Vol.-%} \\ 1.045 \text{ t/m}^3 &< \rho_{FF} < 1.4 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

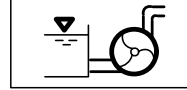
Ziel der Berechnung ist die Ermittlung von Rohrkenlinien des Systems für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Volumenkonzentrationen. Hierzu werden für einige Fördermengen entsprechende manometrische Förderhöhen ermittelt. Diese Werte ergeben die in Bild 4-19 gezeigten Rohrkenlinien. In Tabelle 4-22 sind die entsprechenden Werte für verschiedene Fördermengen zusammengefasst. Auch werden die Bedingungen für den Feststofftransport überprüft (Tabelle 4-23).

- Maximaler Feststoffgehalt in der Flüssigkeit aus der Bedingung $\rho_{FF} \leq 1.4 \text{ t/m}^3$:

$$\mu_{FF}^{\text{max}} = \frac{\rho_{FF}^{\text{max}} - \rho_F}{\rho_0 - \rho_F} \times 100 = \frac{1.4 - 1.045}{2.7 - 1.045} \times 100 = 21 \text{ Vol.-%}$$

- Fließgeschwindigkeit, siehe Fall 1

Flüssigkeitsförderung



- Kritische Fließgeschwindigkeit für Feststofftransport v_{krit} :

Bei maximalem Feststoffgehalt in der Flüssigkeit $\mu_{FF} = 21$ Vol.-% mit:

$$d_m = 3 \text{ mm} \Rightarrow Fr_{krit} = 1 \text{ (Bild 4-14)}$$

$$v_{krit} = Fr_{krit} \times \sqrt{2 \times g \times d \times \frac{\rho_0 - \rho_F}{\rho_F}}$$

$$= 1.0 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.4 \times \frac{2.7 - 1.045}{1.045}} = 3.53 \text{ m/s}$$

- Bedingung für den Transport von Feststoffen:

$$v \geq v_{krit}$$

- Kritische Förderleistung für Transport von Feststoffen, siehe Fall 1:

- Widerstandsbeiwert λ , siehe Fall 1

- Verluste der Saugleitung, siehe Fall 1

- Verluste der Druckleitung, siehe Fall 1

- Erforderliche Saughöhe:

$$\rho_{FF} = 1.045 \text{ t/m}^3 \text{ bzw. } \rho_{FF} = 1.4 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Dichte Wasser: } \rho_W = 1.0 \text{ t/m}^3$$

$$h_{S,erf} = \left(h_{S,geod} + h_{S,Verl} + \frac{v^2}{2 \times g} \right) \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_W} \quad [\text{m}]$$

$$\text{hier: } h_{S,geod} \approx 0 \text{ m}$$

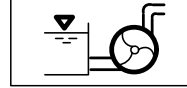
- Zulässige Saughöhe, siehe Fall 1

- Erforderliche Förderhöhe H_{man}^{FF} der Pumpe:

$$H_{man} = h_{geod} + (h_{S,Verl} + h_{D,Verl}) + \frac{v_D^2}{2 \times g} \quad [\text{m}]$$

$$\rho_{FF} = 1.045 \text{ t/m}^3 \text{ bzw. } \rho_{FF} = 1.4 \text{ t/m}^3$$

Flüssigkeitsförderung



$$H_{\text{man}}^{\text{FF}} = H_{\text{man}} \times \frac{\rho_{\text{FF}}}{\rho_{\text{W}}} \quad [\text{m}]$$

- Erforderliche Grundleistung der Kreislpumpe, siehe Fall 1
- Tatsächliche Leistungsaufnahme der Pumpe, siehe Fall 1
- Berechnung der kritischen Fördermengen für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Volumenkonzentrationen:

Feststoffgehalt in der Flüssigkeit mit

$\rho_{\text{FF}} = 1.045 \text{ t/m}^3$ bis $\rho_{\text{FF}} = 1.4 \text{ t/m}^3$, $\rho_0 = 2.7 \text{ t/m}^3$ und $d_m = 3 \text{ mm}$:

$$\mu_{\text{FF}} = \frac{\rho_{\text{FF}} - \rho_{\text{F}}}{\rho_0 - \rho_{\text{F}}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad Fr_{\text{krit}} \quad (\text{Bild 4-14}) \quad \Rightarrow$$

$$v_{\text{krit}} = Fr_{\text{krit}} \times \sqrt{2 \times g \times d \times \frac{\rho_0 - \rho_{\text{F}}}{\rho_{\text{F}}}} \quad [\text{m/s}]$$

Die kritische Fördermenge lässt sich berechnen aus:

$$Q_{\text{FF}} = v_{\text{krit}} \times A = v_{\text{krit}} \times 3600 \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Weiterhin lassen sich die manometrischen Förderhöhen, analog dem Vorgehen für Fall 1, bestimmen:

$$H_{\text{man}}^{\text{FF}} = H_{\text{man}} \times \frac{\rho_{\text{FF}}}{\rho_{\text{W}}} \quad [\text{m}]$$

Die Ergebnisse für die Bestimmung der kritischen Fördermenge für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Gemische sind in Tabelle 4-23 aufgeführt und in Bild 4-19 eingetragen.

Flüssigkeitsförderung



Tabelle 4-22: Fall 2 - Ermittlung der Rohrkenlinie und Leistungen

Q_{FF} [m³/h]	v [m/s]	$v > v_{krit}$	Re	λ [-]	$h_{v,S}$ [m]	$h_{v,E}$ [m]	$h_{S,Verl}$ [m]	$h_{v,D}$ [m]	h_{VolKK} [m]	$h_{D,Verl}$ [m]	$h_{S,erf}$ [m]	$h_{S,erf} < h_{S,zul}$	H_{man} [m]	H_{man}^{FF} [m]	P_{erf} [kW]	η_P [-]	η [-]	P_P [kW]
$\rho_{FF} = 1.045 \text{ t/m}^3$; $\mu_{FF} = 0 \text{ Vol.-%}$																		
10	0.02	-	6.80×10^3	3.43×10^{-2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	ja	40.00	41.80	15.9	0.10	0.09	179.0
500	1.11	-	3.40×10^5	1.44×10^{-2}	0.03	0.00	0.04	1.12	0.021	1.25	0.11	ja	41.36	43.22	74.2	0.45	0.40	185.0
1000	2.21	-	6.80×10^5	1.28×10^{-2}	0.12	0.01	0.15	3.99	0.082	4.48	0.42	ja	44.88	46.90	144.4	0.64	0.57	253.2
1400	3.09	-	9.52×10^5	1.22×10^{-2}	0.22	0.03	0.28	7.44	0.161	8.36	0.80	ja	49.13	51.34	214.0	0.71	0.63	338.3
1600	3.54	-	1.09×10^6	1.20×10^{-2}	0.29	0.04	0.36	9.54	0.21	10.72	1.04	ja	51.71	54.04	254.8	0.73	0.65	391.7
1800	3.98	-	1.22×10^6	1.18×10^{-2}	0.36	0.05	0.45	11.88	0.266	13.36	1.31	ja	54.61	57.07	300.1	0.75	0.67	449.1
2000	4.42	-	1.36×10^6	1.16×10^{-2}	0.43	0.06	0.54	14.46	0.329	16.26	1.61	ja	57.80	60.40	350.6	0.76	0.68	517.8
2200	4.86	-	1.50×10^6	1.15×10^{-2}	0.52	0.07	0.65	17.28	0.398	19.44	1.94	ja	61.30	64.06	406.7	0.76	0.68	600.6
2400	5.31	-	1.63×10^6	1.13×10^{-2}	0.61	0.09	0.77	20.34	0.473	22.89	2.30	ja	65.09	68.02	469.0	0.77	0.69	683.6
$\rho_{FF} = 1.4 \text{ t/m}^3$; $\mu_{FF} = 21 \text{ Vol.-%}$																		
10	0.02	nein	6.80×10^3	3.43×10^{-2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	ja	40.00	55.70	21.3	0.10	0.09	238.5
500	1.11	nein	3.40×10^5	1.44×10^{-2}	0.03	0.00	0.04	1.12	0.021	1.25	0.14	ja	41.36	57.59	98.9	0.40	0.36	277.4
1000	2.21	nein	6.80×10^5	1.28×10^{-2}	0.12	0.01	0.15	3.99	0.082	4.48	0.55	ja	44.88	62.49	192.4	0.62	0.55	348.3
1400	3.09	nein	9.52×10^5	1.22×10^{-2}	0.22	0.03	0.28	7.44	0.161	8.36	1.07	ja	49.13	68.41	285.2	0.68	0.61	470.8
1600	3.54	ja	1.09×10^6	1.20×10^{-2}	0.29	0.04	0.36	9.54	0.21	10.72	1.38	ja	51.71	72.02	339.5	0.71	0.63	536.7
1800	3.98	ja	1.22×10^6	1.18×10^{-2}	0.36	0.05	0.45	11.88	0.266	13.36	1.74	ja	54.61	76.04	399.9	0.72	0.64	623.4
2000	4.42	ja	1.36×10^6	1.16×10^{-2}	0.43	0.06	0.54	14.46	0.329	16.26	2.14	ja	57.80	80.49	467.2	-	-	-
2200	4.86	ja	1.50×10^6	1.15×10^{-2}	0.52	0.07	0.65	17.28	0.398	19.44	2.58	ja	61.30	85.36	542.0	-	-	-
2400	5.31	ja	1.63×10^6	1.13×10^{-2}	0.61	0.09	0.77	20.34	0.473	22.89	3.06	ja	65.09	90.65	624.9	-	-	-

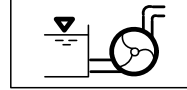


Tabelle 4-23: Kritische Fördermengen für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Gemische

ρ_{FF} [t/m ³]	μ_{FF} [Vol.-%]	Fr_{krit} [-]	v_{krit} [m/s]	Q_{FF} [h/m ³]	H_{man}^{FF} [m]
1.05	0.3	0.8	2.82	1276	50.06
1.1	3.3	0.84	2.96	1340	53.25
1.15	6.3	0.89	3.14	1419	56.77
1.2	9.4	0.93	3.28	1483	60.20
1.25	12.4	0.94	3.31	1499	62.96
1.3	15.4	0.98	3.45	1563	66.58
1.35	18.4	0.99	3.49	1579	69.43
1.4	21.5	1	3.53	1595	72.30

- Tabelle 4-24 zeigt eine Matrix, in der die Abhängigkeiten der Fördermenge und der Rohdichte des Feststoff-Flüssigkeits-Gemischs zur Abbauleistung bzw. der Nettovortriebsleistung dargestellt sind. Für eine Rückrechnung auf die Abbauleistung gilt:

$$Q_0 = Q_{FF} \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_0} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{100}{\mu_{FF}}} \right) = Q_{FF} \times \frac{\rho_{FF}}{\rho_0} \times \left(1 + \frac{1}{\left(\frac{\rho_{FF} - \rho_F}{\rho_0 - \rho_F} \right)} \right)^{-1} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

mit $\rho_0 = 2.7 \text{ t/m}^3$ und $\rho_F = 1.045 \text{ t/m}^3$

Die Nettovortriebsleistung ergibt sich aus der Beziehung:

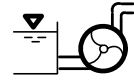
$$Q_0 = I \times A_{Ob} \quad \text{mit} \quad A_{Ob} = \pi \times \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \times \left(\frac{10}{2} \right)^2 = 78.5 \text{ m}^2$$

Flüssigkeitsförderung

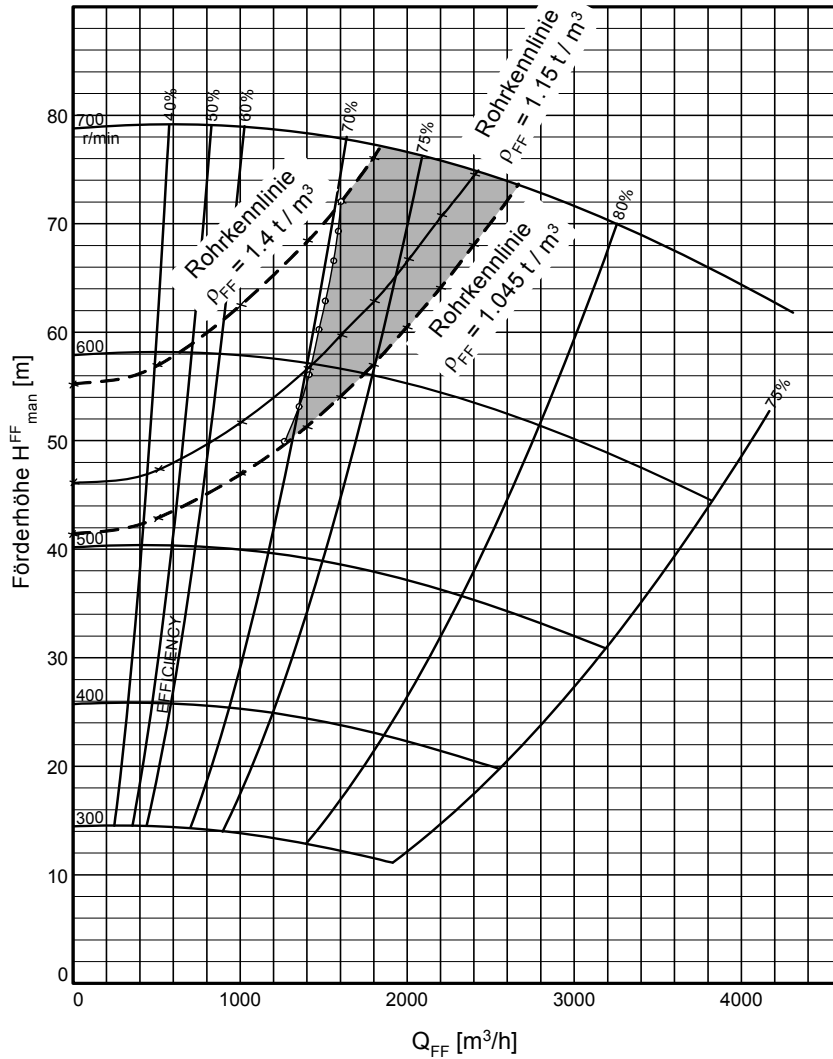


Tabelle 4-24: Matrix der Abhängigkeiten der Abbauleistung (Q_0) bzw. Netto-vortriebsleistung (I) von der Fördermenge und der Rohdichte des Feststoff-Flüssigkeits-Gemischs

		Q_0 [t/h]							
		I [m/h]							
ρ_{FF} [t/m ³] entspricht ca. μ_{FF} [Vol.-%]		1.045 0	1.1 3	1.15 6	1.2 9	1.25 12	1.3 15	1.35 18	1.4 21
Q_{FF} [m ³ /h]	1276	0.0	16.7	32.4	48.6	65.1	82.0	99.3	116.8
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.5
	1300	0.0	17.0	33.0	49.5	66.3	83.6	101.1	119.1
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5
	1400	0.0	18.3	35.6	53.3	71.4	90.0	108.9	128.2
		0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6
	1500	0.0	19.7	38.1	57.1	76.5	96.4	116.7	137.4
		0.0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7
	1600	0.0	21.0	40.7	60.9	81.6	102.9	124.5	146.5
		0.0	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	1.9
	1700	0.0	22.3	43.2	64.7	86.7	109.3	132.3	155.7
		0.0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
	1800	0.0	23.6	45.7	68.5	91.8	115.7	140.1	164.8
		0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
	1900	0.0	24.9	48.3	72.3	96.9	122.1	147.8	174.0
		0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.6	1.9	2.2
	2000	0.0	26.2	50.8	76.1	102.1	128.6	155.6	183.2
		0.0	0.3	0.6	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3
	2100	0.0	27.5	53.4	79.9	107.2	135.0	163.4	192.3
		0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.1	2.4
	2200	0.0	28.8	55.9	83.7	112.3	141.4	171.2	201.5
		0.0	0.4	0.7	1.1	1.4	1.8	2.2	2.6
	2300	0.0	30.1	58.4	87.5	117.4	147.8	179.0	210.6
		0.0	0.4	0.7	1.1	1.5	1.9	2.3	2.7
	2400	0.0	31.4	61.0	91.3	122.5	154.3	186.7	219.8
		0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8
	2500	0.0	32.8	63.5	95.2	127.6	160.7	194.5	228.9
		0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5	2.9
	2600	0.0	34.1	66.1	99.0	132.7	167.1	202.3	238.1
		0.0	0.4	0.8	1.3	1.7	2.1	2.6	3.0
	2650	0.0	34.7	67.3	100.9	135.2	170.3	206.2	242.7
		0.0	0.4	0.9	1.3	1.7	2.2	2.6	3.1



GG 12148



 Betriebsbereich der Pumpe für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Gemische

Bild 4-19: Fall 1 und 2 - Rohr- und Pumpenkennlinie sowie möglicher Betriebsbereich (Pumpe: Warman GG 12148)



4.5 Schneckenförderung

Die volumetrische Grundförderleistung von Förderschnecken ist bezogen auf das Volumen des aufgelockerten Fördergutes. Im Falle des Bodenabbaus, beispielsweise im Tunnelbau, muss daher die abgebaute Bodenmenge im lockeren Zustand betrachtet werden.

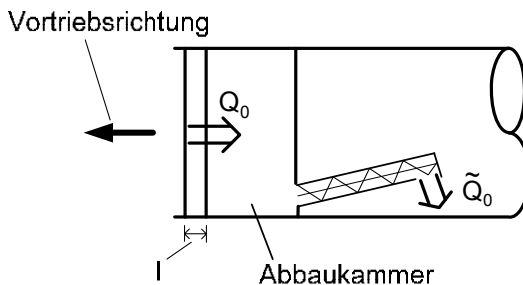


Bild 4-20: Schematische Darstellung eines TVM-Tunnelvortriebs mit Förderschnecke zur Materialabfuhr

$\tilde{Q}_0 = \frac{Q_0}{\alpha}$		[lm ³ /h]
$Q_0 = l \times A_{\text{Tunnel}}$		[fm ³ /h]
$\tilde{Q}_0$	volumetrische Grundförderleistung (Lockermaterial)	[lm ³ /h]
Q_0	Grundabbauleistung (festes Material), z.B. der TVM	[fm ³ /h]
α	Lösefaktor	[fm ³ /lm ³]
l	Nettovortriebsleistung, z.B. der TVM	[m/h]
A_{Tunnel}	Tunnelausbruchfläche	[m ²]

Schneckenförderung



Die **Grundförderleistung** $Q_{m,0}$ [t/h] und die **volumetrische Grundförderleistung** $\tilde{Q}_0$ [lm³/h] von Förderschnecken sind abhängig von der Schneckenengeometrie und dem Fördergut [47].

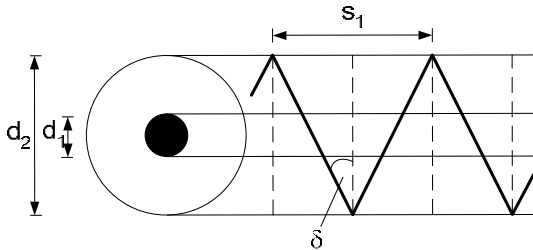


Bild 4-21: Geometrie einer Förderschnecke

$$Q_{m,0} = \rho_S \times \tilde{Q}_0 \times \varphi_0 = \rho_F \times \frac{Q_0}{\alpha} \times \varphi_0 \quad [\text{t/h}]$$

$$\tilde{Q}_0 = A \times v \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

$$A = \frac{d_2^2 - d_1^2}{4} \times \pi \quad [\text{m}^2]$$

$$v = s_1 \times n \quad [\text{m/h}]$$

$Q_{m,0}$	Grundförderleistung	[t/h]
ρ_S	Schüttdichte des Fördergutes (lockeres Material)	[t/lm ³]
$\tilde{Q}_0$	volumetrische Grundförderleistung (lockeres Material)	[lm ³ /h]
φ_0	Grundwert-Füllungsgrad der Förderschnecke	[-]
ρ_F	Dichte des ungelösten Materials in der Ortsbrust	[t/fm ³]
Q_0	Grundabbauleistung (festes Material)	[fm ³ /h]
α	Lösefaktor	[fm ³ /lm ³]
A	Förderquerschnitt der Schnecke	[m ²]
v	Fördergeschwindigkeit der Schnecke	[m/h]
d_2	Schneckendurchmesser, aussen	[m]
d_1	Schneckenachsendurchmesser	[m]
s_1	Schneckenangahöhe	[m]
n	Schneckendrehzahl	[1/h]

Schneckenförderung



Die **Nutzförderleistung** Q_N [t/h] (entspricht dem Abbauvolumen in fester Form) ergibt sich zu

$Q_N = Q_{m,0} \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[t/h]
$k_2 = f_\delta \times f_\beta \times f_{St} \times f_4 \times f_5$	[-]
$f_\beta = 1 - \beta \times 0.02$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]

Q_N	Nutzförderleistung	[t/h]
$Q_{m,0}$	Grundförderleistung	[t/h]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
f_1, f_2, f_3	nicht massgebend	[-]
f_δ	Steigungsfaktor der Schneckenganghöhe	[-]
f_β	Steigungsfaktor der Schneckenachse	[-]
f_{St}	Staufaktor am Zwischenlager	[-]
β	Steigung der Schneckenachse ($0^\circ \equiv$ horizontal)	[°]
f_4	Schneckenzustandsfaktor ≈ 1	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor ≈ 1	[-]
η_2	Betriebsfaktor	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Der Füllungsgrad φ ist abhängig vom Grundwert, der durch die Reibungs- und Hafteigenschaften des Fördergutes bestimmt wird. Ferner beeinflussen schneckenspezifische geometrischen Faktoren wie Steigung der Schneckenganghöhe δ und Steigung der Schneckenachse β die Leistung (Bild 4-22). Auch sind eventuelle Stauungen an Zwischenlagern infolge Überladung zu berücksichtigen.

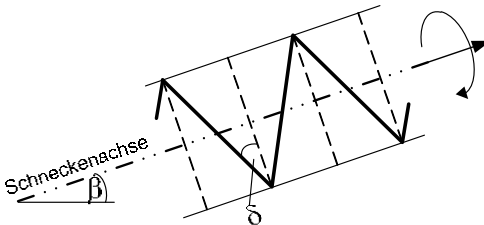


Bild 4-22: Steigungen der Schneckenganghöhe (δ) und der Schneckenachse (β)

Schneckenförderung



Tabelle 4-25: Grundwerte des Füllungsgrads φ_0 nach [47]

Fördergut	Grundwert des Füllungsgrads φ_0 [-]
mässig schleissend, körnig bis kleinstückig (Sand)	≈ 0.3
schwer, stark schleissend (Kies)	≈ 0.15

Tabelle 4-26: Steigungsfaktor f_δ der Schneckenganghöhe nach [47]

Steigung der Schneckenganghöhe δ [°]	Abminderungsfaktor – Steigung der Schneckenganghöhe f_δ [-]
ungewöhnlich gross: > 30	≈ 0.9
übliche Steigung: $17 < \delta < 30$	≈ 1.0

Tabelle 4-27: Staufaktor f_{st} nach [47]

Stauung	Abminderungsfaktor – Ein- fluss von Stauungen f_{st} [-]
Zwischenlager der Schnecke	≈ 0.9
gleichmässiger Fluss, keine Stauungen	≈ 1.0

Tabelle 4-28: Betriebsbedingungen η_2 nach [47]

Betriebsbedingung	Betriebsbedingungen η_2 [-]
rauer Betrieb, schlechte Wartung, häufige Überfüllung, ungleichmässige Beschickung	0.8
guter Betrieb, keine Überfüllung, gleichmässige Beschickung	1

Schneckenförderung



Die **erforderliche Schneckenkraft F_B [kN]** in Förderrichtung kann anhand einer Betrachtung der Förderschnecke über eine definierte Länge Δl hergeleitet werden.

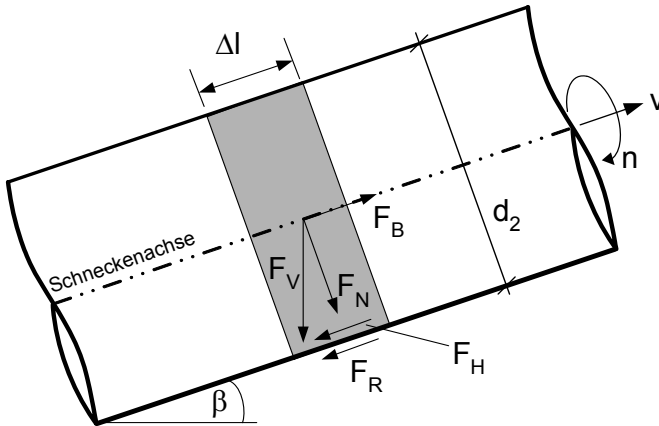


Bild 4-23: Betrachtung eines Ausschnitts der Förderschnecke bezüglich der wirkenden Kräfte

$$F_R = m_{\Delta l} \times g \times \cos \beta \times L \times \lambda \quad [\text{kN}]$$

$$F_H = m_{\Delta l} \times g \times \sin \beta \times L \quad [\text{kN}]$$

$$m_{\Delta l} = \rho_S \times A \times \varphi_0 \times f_{\delta} \times f_{\beta} = \frac{Q_{m,0}}{v} \times f_{\delta} \times f_{\beta} \quad [\text{t/m}]$$

mit

$$H = \sin \beta \times L \quad [\text{m}]$$

Summe aller Kräfte in Achsenrichtung:

$$F_B = F_R + F_H \quad [\text{kN}]$$

$$F_B = \rho_S \times A \times \varphi_0 \times f_{\delta} \times f_{\beta} \times g \times (\cos \beta \times L \times \lambda + H) \quad [\text{kN}]$$

$$= \frac{Q_{m,0}}{v} \times f_{\delta} \times f_{\beta} \times g \times (\cos \beta \times L \times \lambda + H)$$

F_R	Reibungskraft	[kN]
$m_{\Delta l}$	Streckenlast des Fördergutes	[t/m]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
β	Steigung der Schneckenachse	[°]

Schneckenförderung



L	Schneckenlänge	[m]
H	Höhendifferenz zw. Schneckenanfang und –ende	[m]
λ	Verschleibewiderstandsbeiwert	[-]
F_H	Hangabtriebskraft	[kN]
ρ_s	Schüttdichte des Fördergutes (lockeres Material)	[t/m ³]
A	Förderquerschnitt	[m ²]
v	Fördergeschwindigkeit der Schnecke	[m/h]
φ_0	Grundwert-Füllungsgrad der Förderschnecke	[-]
F_B	erforderliche Schneckenkraft	[kN]

Tabelle 4-29: Verschleibewiderstandsbeiwert λ in Abhängigkeit von den Materialien nach [50]

Fördergut	Schüttdichte ρ_s [t/m ³]	Verschleibewiderstandsbeiwert λ [-]
Asche, Schlacke	0.7 – 1.0	3
Kies	1.5 – 1.8	3
Ton, feuchter Lehm	1.8	2
Mergel	1.6 – 1.9	2
Sand	1.4 – 1.7	3
Zement	1.0 – 1.3	2
Mörtel	1.8 – 2.1	3

Die **theoretische Antriebsleistung der Förderschnecke P_A [kW]** und das **Drehmoment des Schneckenantriebs M_D [kNm]** für Förderschnecken ergeben sich zu:

$P_A = F_B \times v = M_D \times \omega$	[kW]
$v = s_1 \times n$	[m/h]
$\omega = 2 \times \pi \times n$	[1/h]
$M_D = \frac{F_B \times v}{\omega} \approx 1.56 \times \frac{\cos \beta \times L \times \lambda + H}{n} \times Q_{m,0}$	[kNm]

P_A	theoretische Antriebsleistung der Förderschnecke	[kW]
F_B	erforderliche Schneckenkraft	[kN]
v	Fördergeschwindigkeit	[m/h]
M_D	Drehmoment des Schneckenantriebs	[kNm]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[1/h]

Schneckenförderung



n	Schneckendrehzahl	[1/h]
s_1	Schneckenganghöhe	[m]
β	Steigung der Schneckenachse	[°]
L	Schneckenlänge	[m]
λ	Verschiebewiderstandsbeiwert	[-]
H	Höhendifferenz zw. Schneckenanfang und -ende	[m]
$Q_{m,0}$	Grundförderleistung	[t/h]

Motorleistung P_M [kW] des Schneckenantriebs

$P_M = \frac{P_A}{\eta_M}$		[kW]
P_M	Motorleistung des Schneckenantriebs	[kW]
P_A	theoretische Antriebsleistung der Förderschnecke	[kW]
η_M	Wirkungsgrad des Motors	[-]

5 Tunnelbaugeräte

Tunnelbohrmaschinen

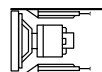
Teilschnittmaschinen

Bohrmaschinen

Bohr- und Sprengarbeiten

Lüftung

Tunnelbohrmaschine



5.1 Tunnelbohrmaschinen [2]

Die Penetration (Eindringtiefe) [m/h] wird durch folgende Faktoren bestimmt [48]:

- Klüftung des Gesteins
- Lage der Klüfte
- Gesteinhärte/-art
- Anpressdruck
- Meisselgrösse

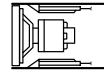
Nettovortriebsleistung I [m/h] (Nettopenetrationsleistung)

$I = k_S \times k_M \times i_b \times m \times \frac{60}{1000}$			[m/h]
I	Nettovortriebsleistung (Penetration)		[m/h]
k_S	Kluffaktor		[-]
k_M	Einflussfaktor der Meisselgrösse		[-]
i_b	max. Penetration pro Bohrkopfumdrehung		[mm/U]
m	Anzahl der Bohrkopfumdrehungen pro Minute		[U/min]

Daraus ergibt sich die **Grundabbauleistung Q_0 [fm³/h]**

$Q_0 = I \times A = I \times \frac{\pi \times D^2}{4}$			[fm ³ /h]
--	--	--	----------------------

Tunnelbohrmaschine



Die **Nutzabbauleistung** Q_N [fm^3/h] beträgt somit

$$Q_N = Q_0 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$$

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = f_4 \times f_5$$

$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$$

[fm^3/h]

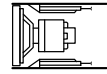
D	Tunnelausbruchdurchmesser	[m]
A	Tunnelausbruchfläche	[m^2]
Q_0	Grundabbauleistung	[fm^3/h]
Q_N	Nutz-/Dauerabbauleistung	[fm^3/h]
$f_1; f_2; f_3$	nicht massgebend	
f_4	Meisselzustand	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
k_1	Abbaubarkeitsfaktor (berücksichtigt im DRI)	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad (einschliesslich Umsetzen der Maschine nach jedem Bohrhub)	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]

Der Lösefaktor bei Fels beträgt:

$$\alpha = \frac{\text{Felsvolumen}_{\text{fest}}}{\text{Felsvolumen}_{\text{gelöst}}} \approx 0.6$$

d.h. das Volumen des gelösten Felses erhöht sich gegenüber dem Volumen des ungelösten Felses um das ca. 1/0.6fache = 1.7fache Volumen.

Tunnelbohrmaschine



Klufffaktor k_s [-]

Die Klüfte und Spalten werden in Klassen eingeteilt [48]:

0	keine Bruchzonen vorhanden	
I	einzelne Klüfte vorhanden	Abstand ca. 40 cm
II	mehrere Klüfte vorhanden	Abstand ca. 20 cm
III	viele Klüfte vorhanden	Abstand ca. 10 cm
IV	sehr viele Klüfte vorhanden, Störzone	Abstand ca. 5 cm

Ebenfalls einen Einfluss auf den Kluffaktor hat der Winkel β zwischen der Tunnelachse und der Kluffläche.

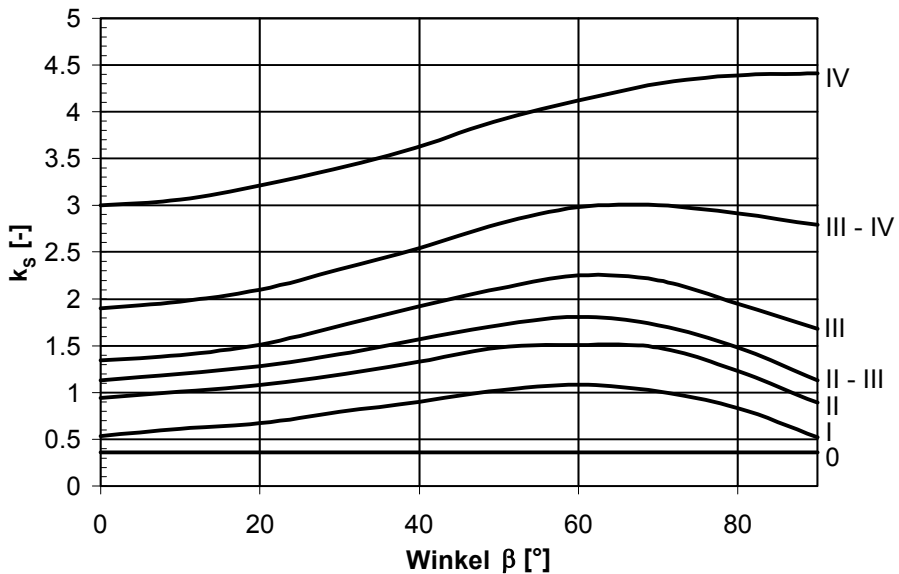
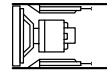


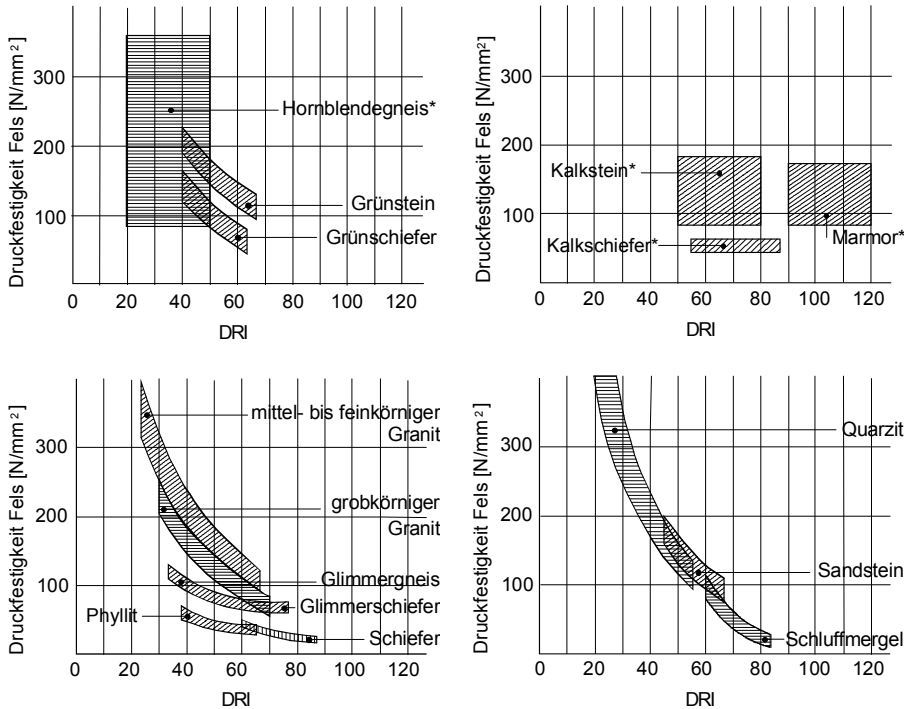
Bild 5-1: Einfluss des Winkels β [°] zwischen der Tunnelachse und den Klufflächen auf den Kluffaktor k_s [-] [48]

Tunnelbohrmaschine



Die **maximale Penetration** i_b [mm/U] ist von der Bohrbarkeit (Drilling Rate Index DRI) des Gesteins und dem Anpressdruck pro Disk abhängig [48].

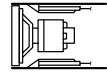
Die **Bohrbarkeit DRI [-]** wird aus den unten stehenden Diagrammen herausgelesen.



*) Diese Felsarten weisen eine hohe Streuung der Druckfestigkeitsbereiche und der DRI-Werte auf. Hier wird eine genauere Untersuchung der Bohrbarkeit angeraten.

Bild 5-2: Bohrbarkeit DRI [-] [48]

Tunnelbohrmaschine



Anpresskraft pro Disk F_i [kN]

$$F_i = \frac{F_A}{n} \quad [\text{kN}]$$

$$F_A = F_{\text{Vorschub}} - F_{\text{ZR}} \quad [\text{kN}]$$

F_i Durchschnittliche Anpresskraft pro Disk [kN]

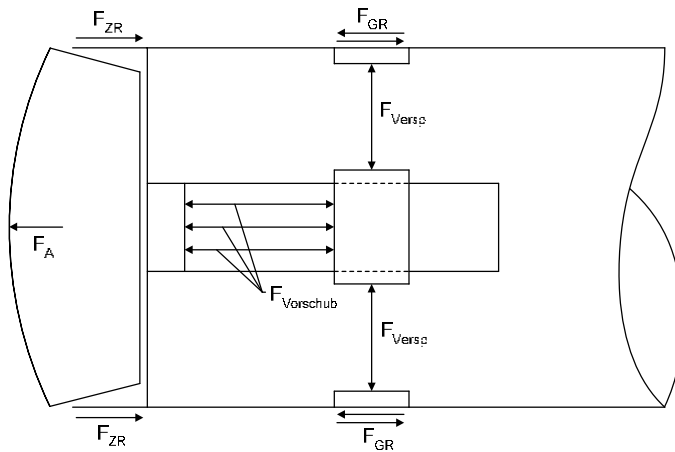
F_A Effektive Anpresskraft des Bohrkopfes [kN]

F_{Vorschub} Vorschubpressenkräfte [kN]

F_{ZR} Reibungskräfte am Bohrkopfmantel [kN]

n Anzahl der Disken am Bohrkopf [-]

Zur Ermittlung der erforderlichen Gripperspannkräfte siehe [2].



F_{Versp} Verspannkraft der Gripper [kN]

F_{GR} Reibungskräfte der Gripper [kN]

Bild 5-3: Kräfte beim Einsatz einer Tunnelbohrmaschine

Tunnelbohrmaschine

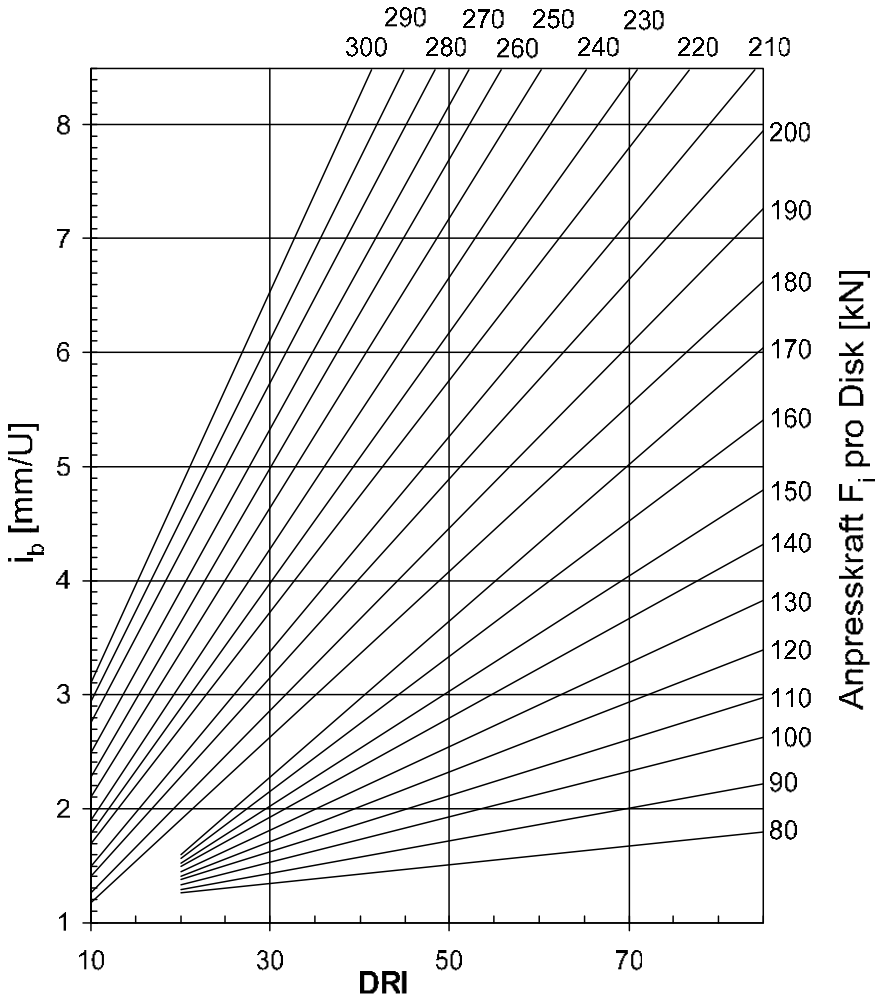
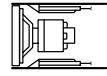
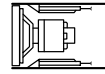


Bild 5-4: Diagramm zur Bestimmung der maximalen Penetration i_b [48]

Tunnelbohrmaschine



Einflussfaktor der Meisselgrösse k_M [-]

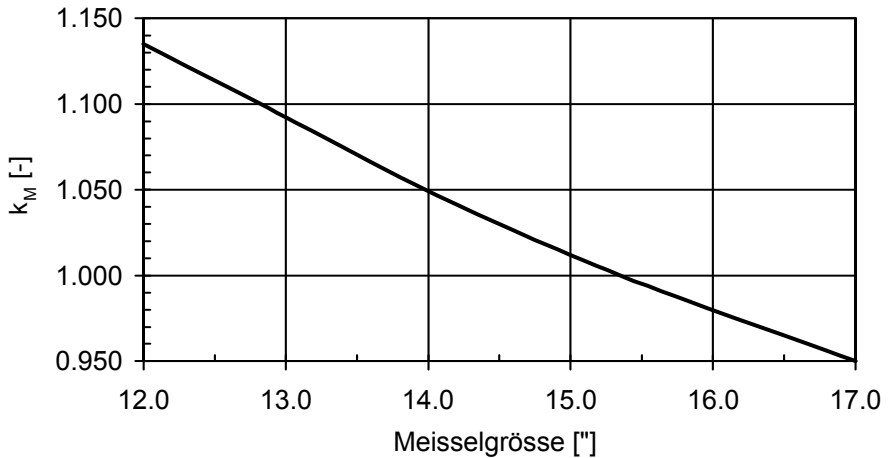


Bild 5-5: Einflussfaktor der Meisselgrösse [48]

Maximale Bohrkopfumdrehungen für Diskenabrollgeschwindigkeit von $v = 110$ m/min [2]:

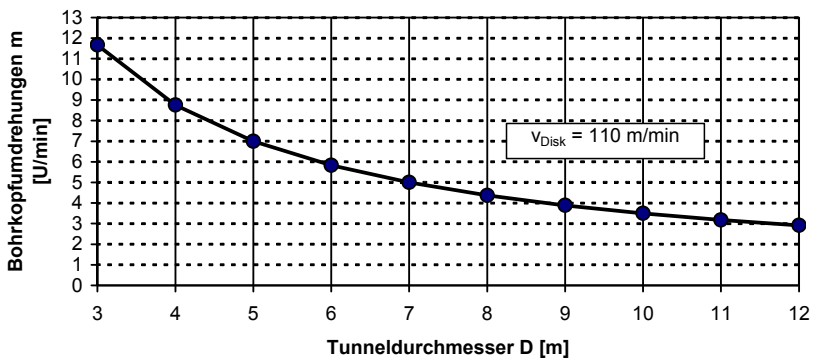


Bild 5-6: Maximale Bohrkopfumdrehungen m für die Diskenabrollgeschwindigkeit $v = 110$ m/min

Teilschnittmaschine



5.2 Teilschnittmaschinen [2]

Nutzabbauleistung Q_N [fm^3/h]

$$Q_N = Q_0 \times k_S \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

$$k_S = k_C \times k_P \quad [-]$$

$$k_2 = f_4 \times f_5 \quad [-]$$

$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2 \quad [-]$$

Q_N Nutzabbauleistung [fm^3/h]

Q_0 mittlere Grundabbauleistung, enthält Schwenkwinkel-
faktor (Bestreichen der Ortsbrust von einem Punkt) [fm^3/h]

$f_1; f_2; f_3$ nicht massgebend [-]

f_4 Meisselzustand [-]

f_5 Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor [-]

k_C Zähigkeitsfaktor [-]

k_P Schichtabstandsfaktor [-]

k_S Schrämbarkeitsfaktor [-]

k_2 Leistungseinflussfaktor [-]

k_3 Betriebsbeiwert [-]

η_G Geräteausnutzungsgrad (einschliesslich Umsetzen
der Maschine an der Ortsbrust) [-]

η_1 Bedienungsfaktor [-]

η_2 Betriebsbedingungen [-]

Teilschnittmaschine

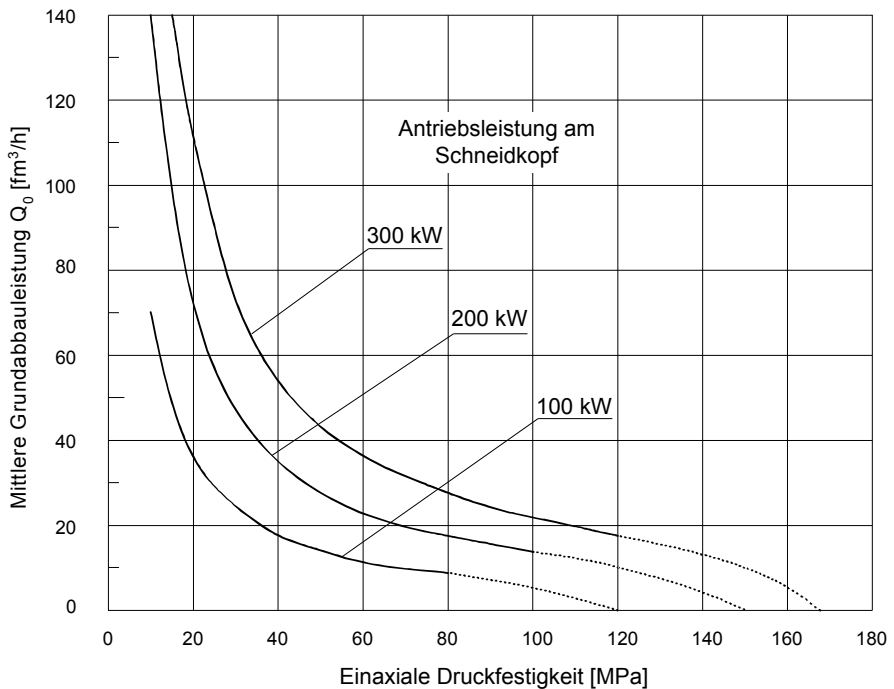


Bild 5-7: Diagramm zur überschlägigen Ermittlung der mittleren Grundabbauleistung Q_0 von TSM

Bild 5-7 zeigt die mittlere Grundabbauleistung von Teilschnittmaschinen als Funktion der einaxialen Druckfestigkeit und der Antriebsleistung am Schrämkopf. Die Zugfestigkeit σ_z des Gesteins wird durch den Zähigkeitsfaktor k_c berücksichtigt.

Teilschnittmaschine

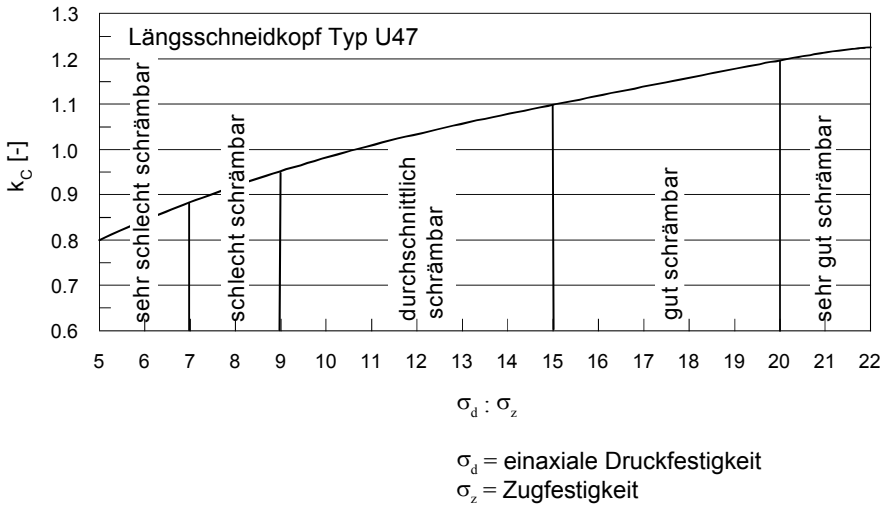


Bild 5-8: Zähigkeitsfaktor $k_C [-]$ – Einfluss des Spannungsverhältnisses σ_d/σ_z [49]

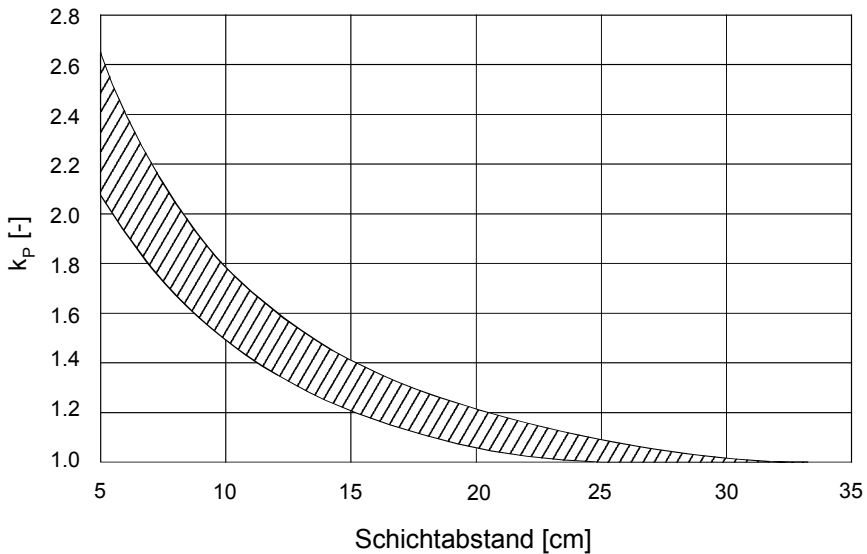
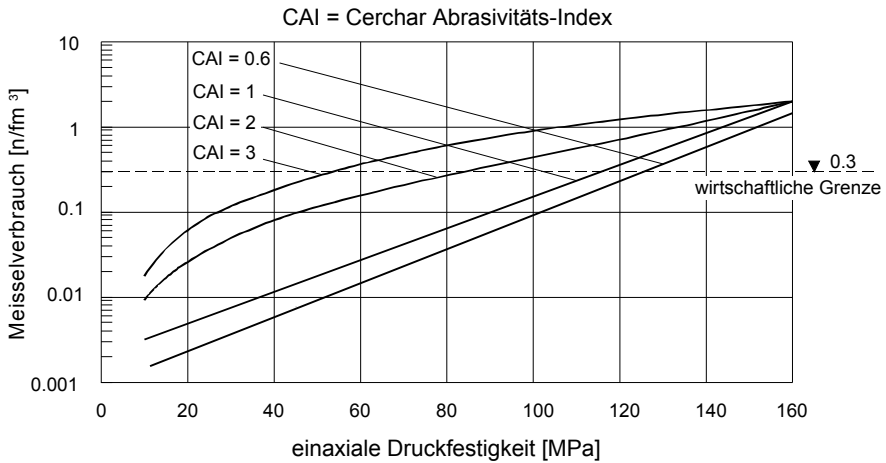


Bild 5-9: Schichtabstandsfaktor $k_P [-]$ [49]:

Teilschnittmaschine



n = Anzahl der Meissel

Bild 5-10: Meisselverbrauch nach [49]

Tagesmeisselverbrauch N_{AT} [n]

$$N_{AT} = v_m \times Q_N \times T_A \quad [n]$$

v_m	Meisselverbrauch	[n/fm ³]
Q_N	Nutzabbauleistung	[fm ³ /h]
T_A	Arbeitsstunden pro Tag	[h]

Gesamtmeisselverbrauch über die Einsatzzeit N_{ET} [n]

$$N_{ET} = \sum_i v_{mi} \times V_i \quad [n]$$

v_{mi}	Meisselverbrauch im Bereich i	[n/fm ³]
i	Bereich mit unterschiedlichem CAI und σ_d	[-]
V_i	Ausbruchvolumen im Bereich i	[fm ³]

Teilschnittmaschine



Optimale Abstimmung: Schrämleistung - Maschinengewicht [2]:

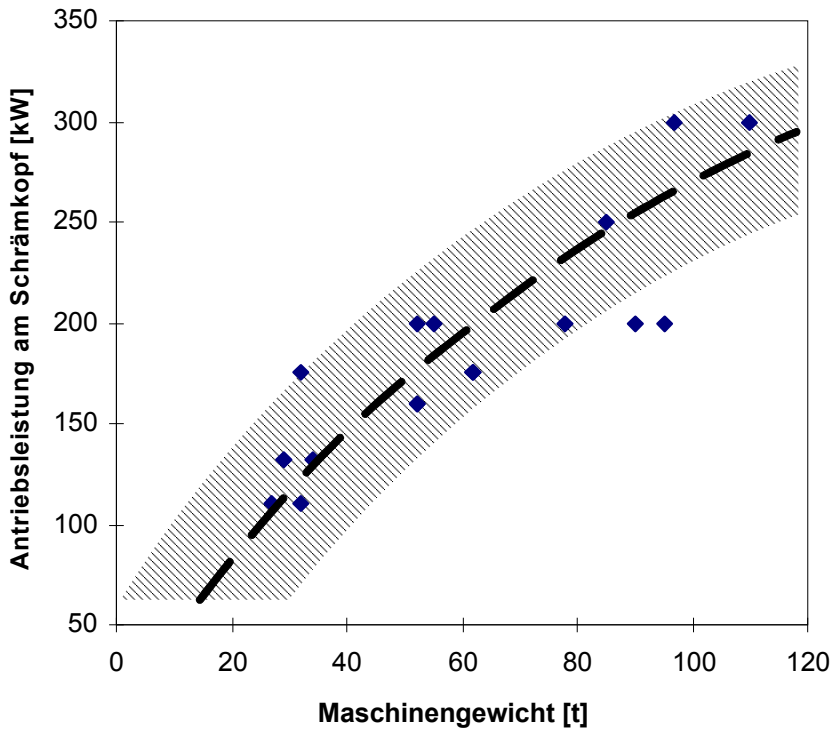


Bild 5-11: Optimierung Schrämleistung (Schneidkopfantrieb) und Maschinengewicht

Bohrmaschinen



5.3 Bohrmaschinen

Grundpenetration $v_{\text{Bohr},0}$ [m/min]

$$v_{\text{Bohr},0} = i_b \times k_S \times k_M \times k_{BS} \quad [\text{m/min}]$$

Nutzpenetration $v_{\text{Bohr},N}$ [m/min]

$$v_{\text{Bohr},N} = v_{\text{Bohr},0} \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{m/min}]$$

$$k_2 = f_4 \times f_5 \quad [-]$$

$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2 \quad [-]$$

$v_{\text{Bohr},0}$	Grundpenetration	[m/min]
i_b	Penetrationsrate	[m/min]
k_S	Einflussfaktor der Schieferung/Anisotropie	[-]
k_M	Faktor für die Wahl des Bohrkopfdurchmessers	[-]
k_{BS}	Faktor zur Berücksichtigung der Art der Bohrstifte	[-]
$v_{\text{Bohr},N}$	Nutzpenetration	[m/min]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
$f_1; f_2; f_3$	nicht massgebend	[-]
f_4	Bohrstift-/Bohrkronenzustandsfaktor	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Die erzielbare Bohrleistung ist abhängig von:

- Leistung, Antriebs- bzw. Kraftübertragungsart, Bohrverfahren, Anpressdruck, Schlagimpuls und -frequenz etc.
- Bohrbarkeit des Gesteins, abhängig von Druckfestigkeit, Zähigkeit, Quarzgehalt etc.
- Anisotropie/Schieferung des Gesteins
- Bohrkronenwahl, Stiffform
- Durchmesser der Bohrung

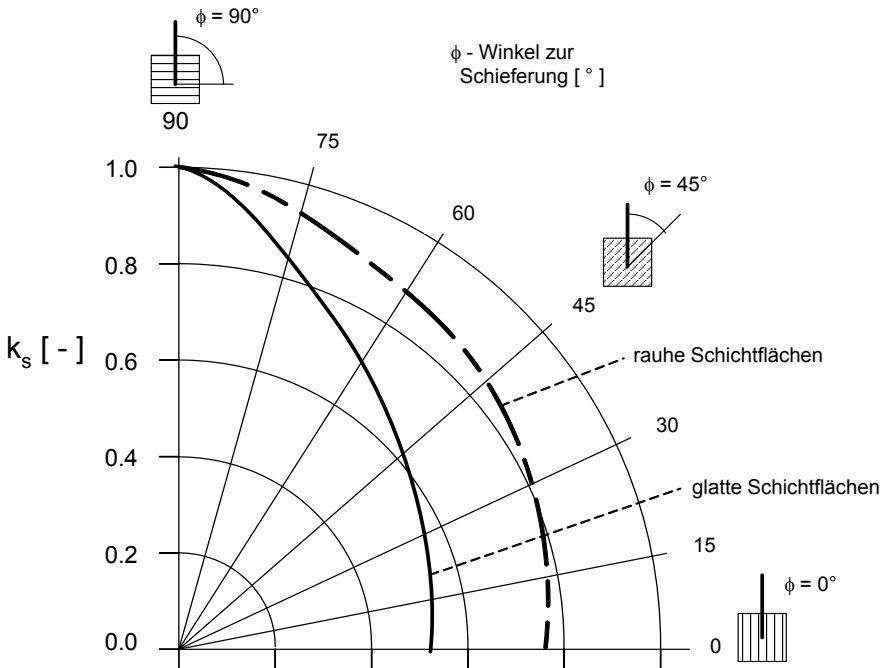


Bild 5-12: Faktor k_s [-] – Einfluss der Anisotropie bei geschieferten Gebirgen nach [50]

Zu Bild 5-12:

Verlauf des Einflussfaktors k_s in Abhängigkeit von der Bohrrichtung für ein Quarzphyllit mit ebenen, glatten Schieferungsflächen (hochgradige Anisotropie; durchgehende Linie) und mit welligen Schieferungsflächen (starke Anisotropie; gestrichelte Linie) [50].

Tabelle 5-1: Faktor k_M [-] – Berücksichtigung der Wahl des Bohrkopfdurchmessers bei gleicher Hammerleistung

Bohrkopfdurchmesser $\varnothing$ [mm]	45	64	128
Anzahl der Bohrstifte [-]	6 bzw. 9	12	22
Abminderungsfaktor k_M [-]	1	0.8 – 0.6	0.4 – 0.6

Bohrmaschinen



Tabelle 5-2: Faktor k_{BS} [-] zur Berücksichtigung der Art der Bohrstifte nach [50]

Stiftform	Faktor k_{BS} [-]
ballistisch	1.0
sphärisch	0.85

Tabelle 5-3: Praxiswerte für die Penetrationsrate i_b [m/min] in Abhängigkeit von der Gesteinsart und der einaxialen Druckfestigkeit nach [51]

Drehschlagbohrmaschine: Leistung 20 kW, z.B. Atlas Copco COP 1838		
Gesteinsart	einaxiale Druckfestigkeit σ_c [N/mm ²]	typische Penetrationsrate i_b [m/min]
Granit / Gneis	150 – 220	2.8 – 3.5
Kieselkalk	200 – 270	2.5 – 3.5
Tonstein (Mergel)	20* – 80	2.0 – 3.0
Sandstein (Molasse)	40* – 150	3.0 – 4.0
* Anmerkung: Gebirge mit tonigen Anteilen führt beim Bohren zu Leistungsminderungen durch Verkleben / Verstopfen der Spülöffnungen der Bohrkronen		

Tabelle 5-4: Trendbeziehung Bohrbarkeit – Bohrgeschwindigkeit – Bohrkronenverbrauch nach [52]

Bohrbarkeit	Grundpenetration		Verschleiss / Standzeit	
	Bezeichnung	$V_{Bohr,0}$ [m/min]	Bezeichnung	I_{stand} [Bohrmeter/Krone]*
leicht	sehr hoch	> 4	sehr gering	> 2500
normal	hoch	3 – 4	gering	1500 – 2500
schwer	mittel	2 – 3	mittel	1000 – 1500
sehr schwer	gering	1 – 2	hoch	500 – 1000
extrem schwer	sehr gering	< 1	sehr hoch	200 – 500
extrem schwer	sehr gering	< 1	extrem hoch	< 200
* bezogen auf Stiftekronen mit Bohrkronendurchmesser zwischen 43 und 48 mm, hauptsächlich 45 mm				



5.4 Bohren und Sprengen einer Ortsbrust [2]

Gesamte Bohrzeit T_B [min]

$T_B = \sum t_B + \sum \Delta t_{\text{Umsetz}} + t_{\text{Vermess}}$	[min]
$T_B = \frac{n \times l_B}{n_B \times v_{\text{Bohr},N}} + \frac{n \times \Delta t_{\text{Umsetz}}}{n_B} + n \times \Delta t_{\text{Vermess}}$	[min]

$\sum t_B$	Gesamte Bohrzeit für die Bohrlöcher eines Abschlags	[min]
n	Anzahl Bohrlöcher	[-]
l_B	Bohrlochtiefe	[m]
n_B	Anzahl der Bohrarme am Jumbo (2 bis 3)	[-]
$v_{\text{Bohr},N}$	reine Bohrgeschwindigkeit, abhängig von der Gesteinsfestigkeit, Abrasivität etc.	[m/min]
Δt_{Umsetz}	Umsetzzeit eines Bohrarms zum nächsten Bohransatzpunkt	[min]
t_{Vermess}	Gesamteinmesszeit aller Bohrlöcher, bei automatischen Bohrgeräten ≈ 0	[min]
$\Delta t_{\text{Vermess}}$	Einmessung und Markierung eines Bohransatzpunkts (bei teil- bzw. vollautomatisierten Jumbos $\Delta t_{\text{Vermess}} = 0$)	[min]

Zeit für das Umsetzen des Bohrjumbos von einer Ortsbrustseite zur anderen und das Einrichten:

$$T_{\text{Ein}} = 15 \text{ min}$$

Die **Sprengzeit** setzt sich zusammen aus der Zeit für das Laden der Bohrlöcher, das Verdrahten, das Prüfen und Zünden der Ladungen sowie aus der Zeit für das anschliessende Lüften.

Ladezeit T_L [min]

$T_L = \frac{n \times l_B}{n_A \times q_A}$	[min]
---	-------

n_A	Anzahl der Arbeiter	[-]
q_A	Ladeleistung pro Arbeiter (1 – 2 m/min)	[m/min]

Sprengen



Verdrahtungszeit T_V [min]

$$T_V = n \times \bar{t}_{\text{Verd}} \quad [\text{min}]$$

T_V	Verdrahtungszeit	[min]
$\bar{t}_{\text{Verd}}$	Verdrahtungszeit pro Bohrloch (0.2 – 0.5 min/Loch)	[min/Loch]

Zeit für Prüfen und Zünden T_{PZ} [min]: $T_{PZ} = 15 \text{ min}$

Zeit für das Lüften $T_{\text{Lüft}}$ [min]: $T_{\text{Lüft}} = 15 \text{ min}$

Da die Arbeiten heute weitgehend parallel verlaufen, können sie nicht als einfache Summe abgebildet werden. Beim Einsatz von lafettierten Bohrgeräten und Verwendung von patroniertem oder Emulsionssprengstoff darf bei gebotener Vorsicht bis zum Abstand eines Fünftels der Bohrlochtiefe, **mindestens aber 1 m**, von geladenen Bohrlöchern gebohrt werden [53]. Dies bedeutet, dass das Laden der Bohrlöcher parallel zum Bohren durchgeführt und nach ca. einem Viertel bis der Hälfte der gebohrten Löcher begonnen werden kann. Gleichzeitig kann nach Fertigstellung des Ladevorgangs einer Ortsbrusthälfte bereits mit dem Verdrahten der Zündstufen begonnen werden.

Nachfolgend wird ein solches Beispiel dargestellt, das eine weitgehende Parallelität eines Teils des Sprengvortriebszyklus ermöglicht.

Folgende Arbeiten verlaufen parallel:

1. Phase:

- Der Bohrjumbo bohrt Sprenglöcher auf der linken Hälfte der Ortsbrust.
- Das Ankerbohrgerät setzt auf der rechten Tunnelgewölbeseite Anker.

Zwischenphase: Gerätewechsel

2. Phase:

- Der Bohrjumbo bohrt Sprenglöcher auf der rechten Hälfte der Ortsbrust.
- Das Ankerbohrgerät setzt auf der linken Tunnelgewölbeseite Anker.
- Vom Ankerbohrgerät wird mittels Ladekorb auf der linken Ortsbrusthälfte patronierter oder Emulsionssprengstoff geladen.
- Anschliessend folgt auf der linken Ortsbrusthälfte die Verdrahtung der Sprengladungen.

Sprengen



3. Phase:

- Laden der rechten Seite der Ortsbrust vom Ladekorb des Bohrjumbos
- Anschliessend folgt auf der rechten Ortsbrusthälfte die Verdrahtung der Sprengladungen.
- Rückziehen des Bohrjumbos

4. Phase:

- Prüfen und Zünden der Ladungen

5. Phase:

- Lüften

Des Weiteren folgt das Profilieren des Querschnitts nach dem Sprengen und das anschliessende Schuttern.

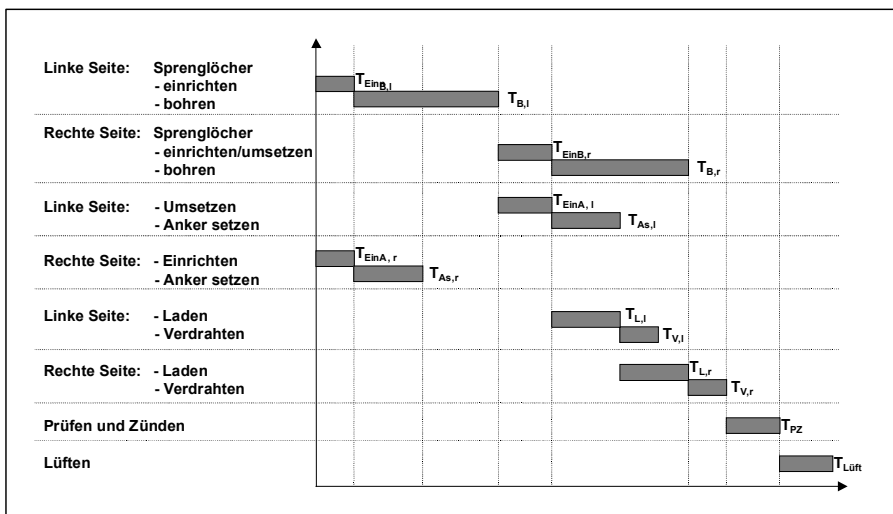


Bild 5-13: Zeitlicher Ablauf eines parallel verlaufenden Sprengvortriebszyklus

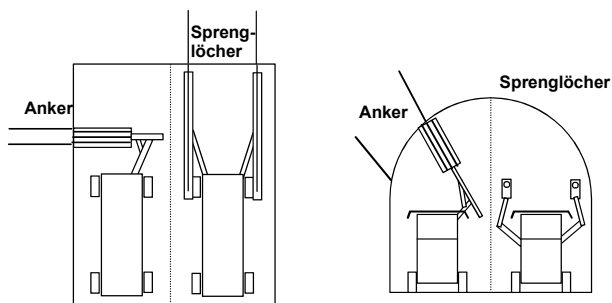


Bild 5-14: Parallel verlaufender Vortrieb



5.5 Lüftung [2]

Entsprechend SUVA [54] bzw. TBG [55], [56] ist eine ausreichende Lüftung sicherzustellen. Es gelten folgende Mindestanforderungen:

- Dauernde Bereitstellung von Atemluft mit einem Sauerstoffanteil von mindestens 20 Vol.-%.
- Die Anteile der gesundheitsschädlichen Staube und Gase dürfen die MAK-Werte (maximale Arbeitsplatzkonzentration) nicht übersteigen.

Abbau durch Sprengen:

- Aufnahme der Arbeit an der Sprengstelle nach frühestens 15 Minuten Lüftungszeit.
- Die Förderleistung der Lüftung muss im grössten ausgebrochenen Profil eine Luftgeschwindigkeit von mindestens 0.30 m/s erzielen (dieser Wert gilt bei einer Sprengpause von 15 Minuten; bei Verlängerung der Wartezeit kann die Leistung der Lüftung im umgekehrten Verhältnis herabgesetzt werden).
- Für die gleichzeitig unter Tag in Betrieb stehenden Fahrzeuge und Maschinen sollen mindestens 4 m³ Frischluft pro Minute und DIN-PS zur Verfügung stehen (berücksichtigt werden nur die Nennleistungen aller Grossgeräte).

Sprengfreier Abbau

- Für jede unter Tag beschäftigte Person sind 1.5 m³ Frischluft pro Minute zuzuführen.
- Für die gleichzeitig unter Tag in Betrieb stehenden Fahrzeuge und Maschinen sollen mindestens 4 m³ Frischluft pro Minute und DIN-PS zur Verfügung stehen (berücksichtigt werden nur die Nennleistungen aller Grossgeräte).

Die Zuführung der Frischluft erfolgt meistens mittels Lutten. Bei diesen, aus einzelnen Luttenelementen von gleich grossem Durchmesser bestehenden Lüftungsaggregaten, können die Druck- und Leckverluste in den verschiedenen Bauphasen direkt aus den Berechnungsdiagrammen abgelesen werden.

Für Lutten mit spürbaren Drucksprüngen infolge Durchmesseränderungen, Umlenkungen, Vereinigungen, Abzweigungen oder Zwischenventilatoren sei auf Norm SIA 196 [57] verwiesen.



Lüttengütekategorie S:

neue Lütten, nur sehr geringe Verluste, regelmässig gewartet, meist Lüttenspeicher erforderlich (Undichtigkeit ca. $5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$)

Lüttengütekategorie A:

neue Lütten, nur geringe Verluste (Undichtigkeit ca. $10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$)

Lüttengütekategorie B:

gebrauchte Lütten mit höheren Verlusten, etwas höhere Porosität des Lüttenrohrs (Undichtigkeit ca. $20 \text{ mm}^2/\text{m}^2$)

Die Lutte hat an den Stossstellen der Lüttenelemente und durch kleine Beschädigungen immer undichte Stellen. Es ist rechnerisch zulässig, die unvermeidlichen Undichtigkeiten als über die ganze Abschnittlänge gleichmässig verteilt anzunehmen.

Grosse Einzelecks werden mit dieser Berechnungsmethode nicht erfasst, sie lassen sich jedoch leicht feststellen und sollten gedichtet werden.

Bemessungsverfahren

Ausgehend von einem sicherzustellenden Luftwechsel (gegeben als Q , u und p) im Tunnelquerschnitt werden die erforderlichen Werte am Ende der Lutte (Q_0 , u_0 , p_0) bestimmt. Mit Hilfe der Diagramme Bild 5-17 bis Bild 5-19 sind die entsprechenden Kennwerte am Lüttenanfang (Q_1 , u_1 , p_1) festzulegen. Diese Werte bilden die Basis zur nachfolgenden Bemessung des entsprechenden Ventilators.

Es ist darauf zu achten, dass der zulässigen Werte für den Innendruck der Lutte an keiner Stelle der Lutte überschritten werden. Für den Fall der Überschreitung des zulässigen Lüttinnendruckes sind alternativ zu wenigen grösseren Ventilatoren entsprechend dimensionierte, kleinere Ventilatoren im Verlauf der Lutte anzuordnen (Bild 5-15).

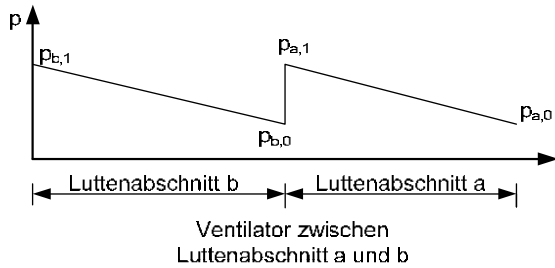


Bild 5-15: schematischer Druckverlauf bei der Anordnung mehrerer Luttenabschnitte mit Ventilator zwischen den Abschnitten

Erklärung zu den nachfolgenden Diagrammen:

Gegeben sind die Größen

- Güte der Lutte (S; A; B)
- Länge der Lutte (L)
- Durchmesser der Lutte (d)
- Statischer Druck $p_{i,1}$ am Luttenabschnittsanfang
- Statischer Druck $p_{i,0}$ am Luttenabschnittsende
- Lage des Luttenabschnittes im Lüftungssystem, ausgedrückt durch den statischen Druck p_0 am Luttenende
- Luftmenge Q_0 am Abschnittsende

Herausgelesen werden

- die Luftmenge Q_1 am Abschnittsanfang relativ zu Q_0 am Abschnittsende
- der statische Überdruck p_1 in der Lutte beim Ventilator am Abschnittsanfang

Berechnung der erforderlichen Ventilationsleistung:

Kontinuitätsgleichung:

$$Q_1 = Q_0 + \Delta Q (f^0, u, p) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Q_1	Erforderliche Ventilatorsaugleistung	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Q_0	Erforderliche Luftmenge am Luttenende	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$\Delta Q (f^0, u, p)$	Leckverlustmenge in Abhängigkeit von f^0, u, p	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$f^0(S; A; B)$	Undichtigkeit der Lutte (Klassen S, A und B [57])	$[\text{mm}^2/\text{m}^2]$

Lüftung



Der **Gesamtdruck am Ventilator** p_{vent} [Pa] ergibt sich aus der Bernoulli'schen Gleichung [57]:

$$p_{\text{vent}} = \frac{\rho}{2} u_1^2 + \sum_i \zeta_i \frac{\rho}{2} u_i^2 + p_1 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_1 = p_0 + \frac{\rho}{2} u_0^2 + \Delta p(\lambda, L / d, f^0, u_i) \quad ; f^0 = f^0(S; A; B) \quad [\text{Pa}]$$

p_{vent}	Gesamtdruck am Ventilator (vor Punkt 1)	[Pa]
$\frac{\rho}{2} u_1^2$	Dynamischer Druck am Luttenanfang	[Pa]
$\sum_i \zeta_i \frac{\rho}{2} u_i^2$	Einzelverluste aus Eintritts-, Schutzgitter-, Krümmungs-, Verengungs- und Erweiterungsverlusten	[Pa]
u_0	Luftaustrittsgeschwindigkeit (Punkt 0)	[m/s]
u_1	Lufteintrittsgeschwindigkeit (Punkt 1)	[m/s]
p_0	Druck am Luttenende	[Pa]
p_1	Statischer Druck am Ventilator, zusammengesetzt aus Reibungsverlust der Luttenwand, Leckverlust durch Undichtigkeit und Ausblasverlust (wird mit Hilfe der Diagramme ermittelt).	[Pa]
$\frac{\rho}{2} u_0^2$	Dynamischer Druck am Luttenende	[Pa]
$\Delta p(\lambda, L/d, f^0, u_i)$	Druckverlust entlang der Lutte	[Pa]
λ	Gemittelter Rohrreibungskoeffizient der Lutte	[-]
A_L	Luttenquerschnitt	[m ²]
d	Durchmesser der Lutte	[m]
L	Luttenlänge	[m]

Lüftung



Die Berechnung von Q_1 und p_1 mit Hilfe der Diagramme wird wie folgt durchgeführt:

Ventilatorleistung Q_1 [m^3/s]

$$\Pi_0 = \left(\frac{p_0}{\frac{\rho}{2} u_0^2}; \frac{L}{d}; f^0(S; A; B) \right) \Rightarrow \omega = \frac{Q_1}{Q_0}$$

$$Q_1 = \omega \times Q_0 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$A_L = \frac{d^2 \times \pi}{4} \quad [\text{m}^2]$$

$$u_1 = \frac{Q_1}{A_L} \quad [\text{m/s}]$$

$$u_0 = \frac{Q_0}{A_L} \quad [\text{m/s}]$$

Statischer Druck am Ventilator p_1 [Pa]

$$\Pi_0 = \left(\frac{p_0}{\frac{\rho}{2} u_0^2}; \frac{L}{d}; f^0(S; A; B) \right) \Rightarrow \Pi_1 = \frac{p_1}{\frac{\rho}{2} u_0^2}$$

$$p_1 = \Pi_1 \frac{\rho}{2} u_0^2 \quad \begin{array}{l} \text{Der zulässige Luttendruck darf nicht} \\ \text{überschritten werden.} \end{array} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_1 \leq p \quad \begin{array}{l} \text{zulässiger Luttendruck} \end{array} \quad [\text{Pa}]$$

Mittels der Parameter u_1 und p_1 kann p_{vent} bestimmt werden. Zur Ermittlung des optimalen Ventilators muss die Luttenkennlinie p - Q aufgestellt werden. Dies geschieht durch die Wiederholung des obigen Rechengangs für verschiedene Bauabschnittslängen L_i bei konstantem Q_0 . Die Luttenkennlinie wird in die jeweilige Ventilator-Drosselkurve eingetragen, um das optimale Gerät in Abhängigkeit seiner Umdrehungszahl mit den optimalen Betriebsbedingungen für die



verschiedenen Bauabschnittslängen L_i zu ermitteln (siehe analog Pumpen-Rohrleitungskennlinie bei der Flüssigkeitsförderung in Kapitel 4). Aus der Luttenkennlinie bestimmt man $(Q_1^{\max}; p_{\text{vent}}^{\max}) = f(L_{\text{Tunnel}}^{\max})$ zur Dimensionierung der maximalen elektrischen Anschlussleistung des Ventilators.

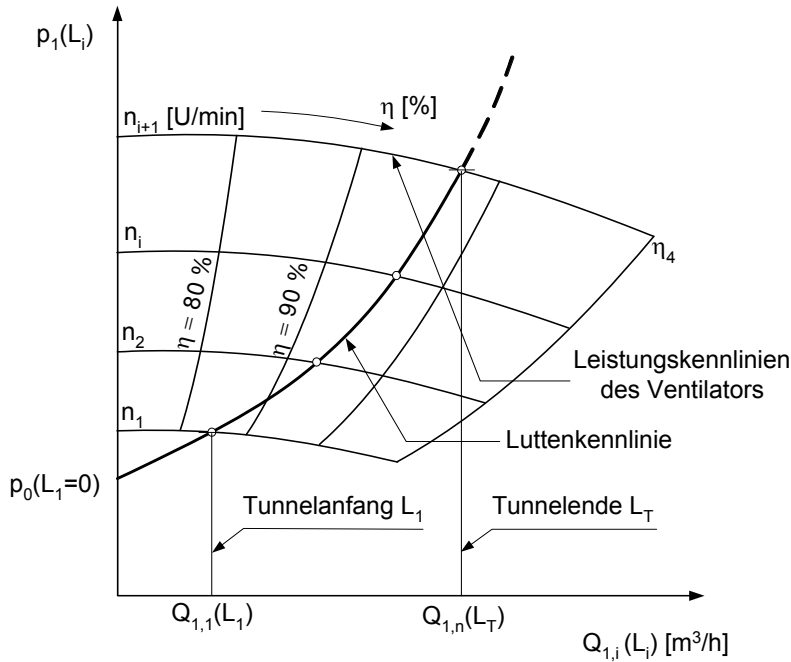


Bild 5-16: Dimensionierung des Ventilators

Elektrische Anschlussleistung des Ventilators N [kW]

$$N = \frac{Q_1}{\eta_{\text{vent}}} \times \frac{p_{\text{vent}}}{\eta_{\text{Motor}}} \times 10^3 \quad [\text{kW}]$$

η_{vent}	Ventilatorwirkungsgrad	[-]
η_{Motor}	Motorenwirkungsgrad	[-]

Lüftung



Berechnungsdiagramm [57] für Lutten der Güteklasse S:

$$\lambda = 0.015 \quad f^0(S) = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2 = 5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$

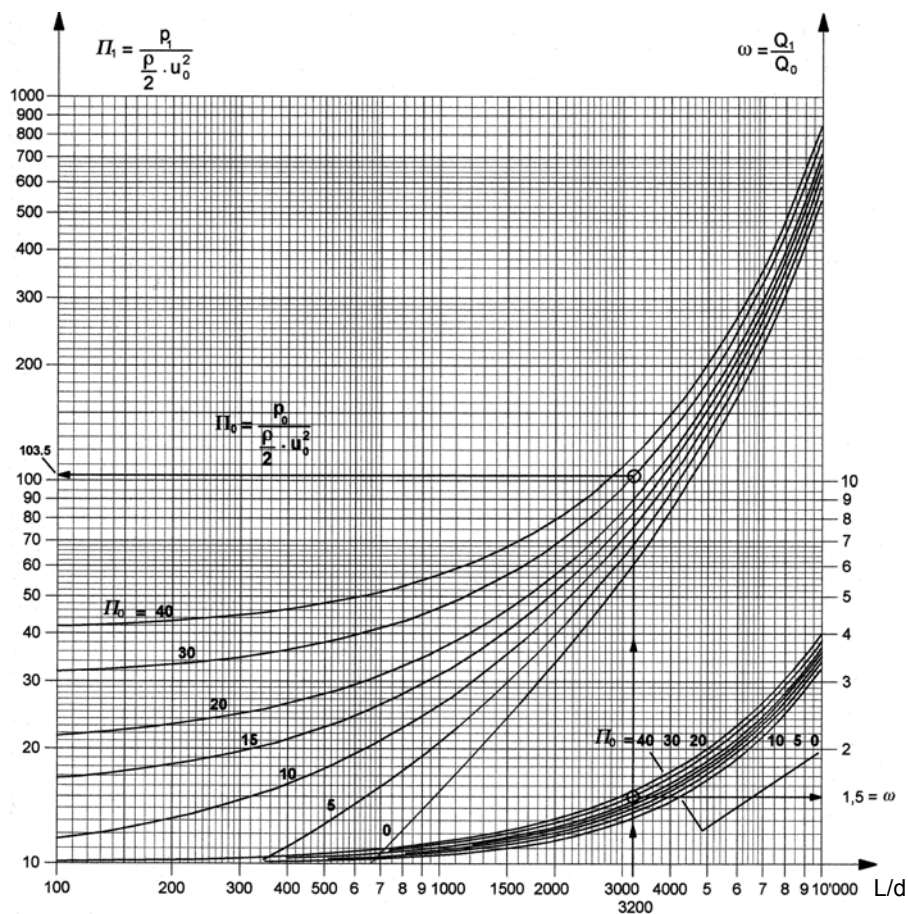
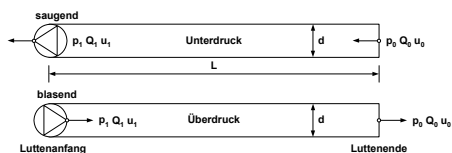


Bild 5-17: Berechnungsdiagramm [57] für Lutten der Güteklasse S

Lüftung



Berechnungsdiagramm [57] für Lutten der Güteklasse A:

$$\lambda = 0.018$$

$$f^0(A) = 10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2 = 10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$

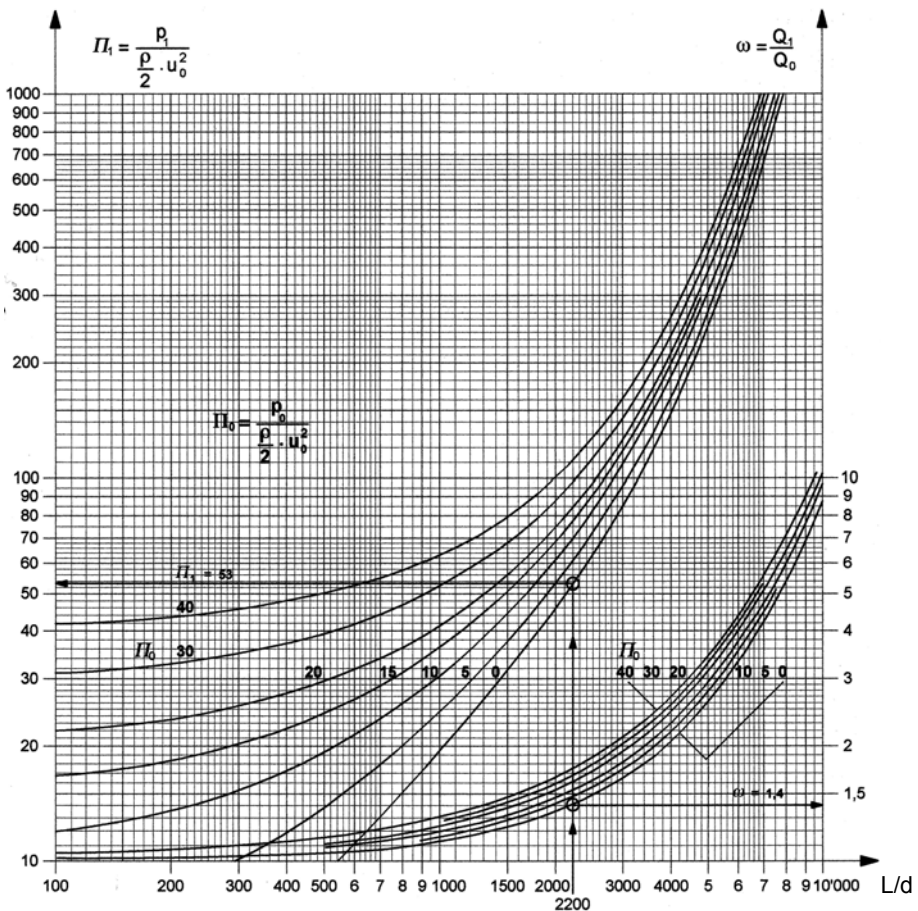
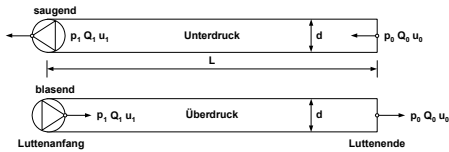


Bild 5-18: Berechnungsdiagramm [57] für Lutten der Güteklasse A

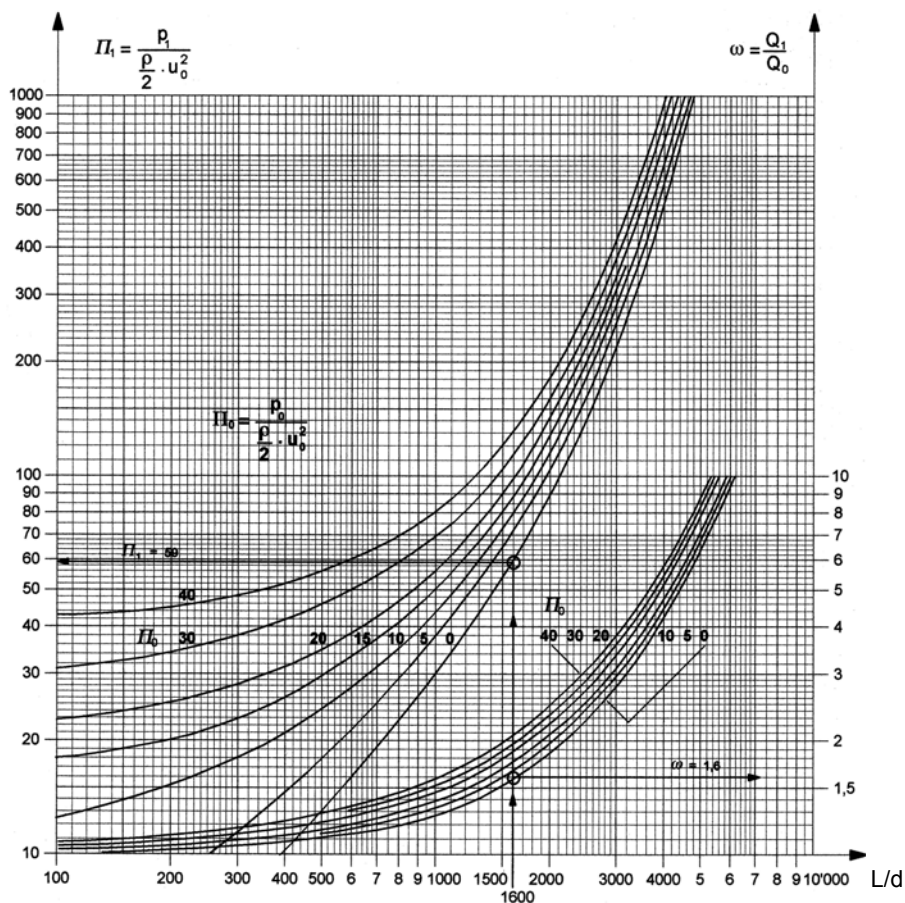
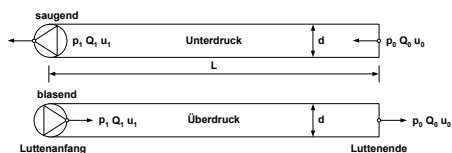
$$\lambda = 0.024 \quad f^0(B) = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2 = 20 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$


Bild 5-19: Berechnungsdiagramm [57] für Lutten der Güteklasse B

6 Spezialtiefbau

Jetgrouting

Rammen

Jetgrouting



6.1 Jetgrouting

Die **Strahlenergie E [J]** des Düsenstrahls repräsentiert die Schneidkraft eines Flüssigkeitsstrahls und beträgt [2]:

$E = \frac{m \times v^2}{2}$	[J]
------------------------------	-----

E	Strahlenergie	[J]
m	Injektionsmedium-/suspension	[kg]
v	Strahlgeschwindigkeit	[m/s]

Folgende Beziehungen gelten für den Kontrollbereich des Injektionsdüsenkopfs:

Kontinuitätsgleichung: $v_G \times A_G = v_{Dü,aus} \times A_{Dü,aus}$	[m/s]
--	-------

v_G	Geschwindigkeit im Bohrgestänge (vor Eintritt in die Düse)	[m/s]
A_G	Querschnitt im Bohrgestänge	[m ²]
$v_{Dü,aus}$	Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse	[m/s]
$A_{Dü,aus}$	Querschnitt am Düsenaustritt	[m ²]

Druckverlust Δp [kN/m²] in der Düse

$\Delta p = \zeta \times \rho \times \frac{v_{Dü,aus}^2}{2}$	[kN/m ²]
--	----------------------

Δp	Druckverlust in der Düse	[kN/m ²]
ζ	Düsenabhängiger Verlustbeiwert	[-]
ρ	Dichte der Injektionssuspension	[kg/m ³]

Jetgrouting



$$\text{Bernoulli: } p_G + \frac{\rho}{2} \times v_G^2 = p_{Dü,aus} + \frac{\rho}{2} \times v_{Dü,aus}^2 \times (1 + \zeta) \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$\text{mit } v_G = v_{Dü,aus} \times \frac{A_{Dü,aus}}{A_G} = v_{Dü,aus} \times \beta \quad [\text{m/s}]$$

p_G Injektionsdruck im Bohrgestänge $[\text{kN/m}^2]$

$p_{Dü,aus}$ Injektionsdruck am Düsenaustritt $[\text{kN/m}^2]$

β Querschnittsverhältnis aus $A_{Dü,aus}$ und A_G $[-]$

Somit beträgt die **Düsenstrahlaustrittsgeschwindigkeit $v_{Dü,aus}$ [m/s]:**

$$v_{Dü,aus} = \sqrt{\frac{2}{\rho \times (1 + \zeta - \beta^2)} \times (p_G - p_{Dü,aus})} \quad [\text{m/s}]$$

$$= \alpha \times A_{Dü,aus} \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \times (p_G - p_{Dü,aus})}$$

$$\alpha = \frac{1}{A_{Dü,aus}} \times \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta - \beta^2}} \quad \beta = \frac{A_{Dü,aus}}{A_G}$$

α Düsenkorrekturfaktor $[-]$

Austrittsmenge an Injektionsgut $Q_{\text{Suspension}}$ [m³/s]

$$Q_{\text{Suspension}} = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times v_{Dü,aus} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$Q_{\text{Suspension}}$ Injektionsvolumenstrom am Austritt $[\text{m}^3/\text{s}]$

d Düsendurchmesser $[\text{m}]$

Jetgrouting



Pumpendruck - manometrischer Druck

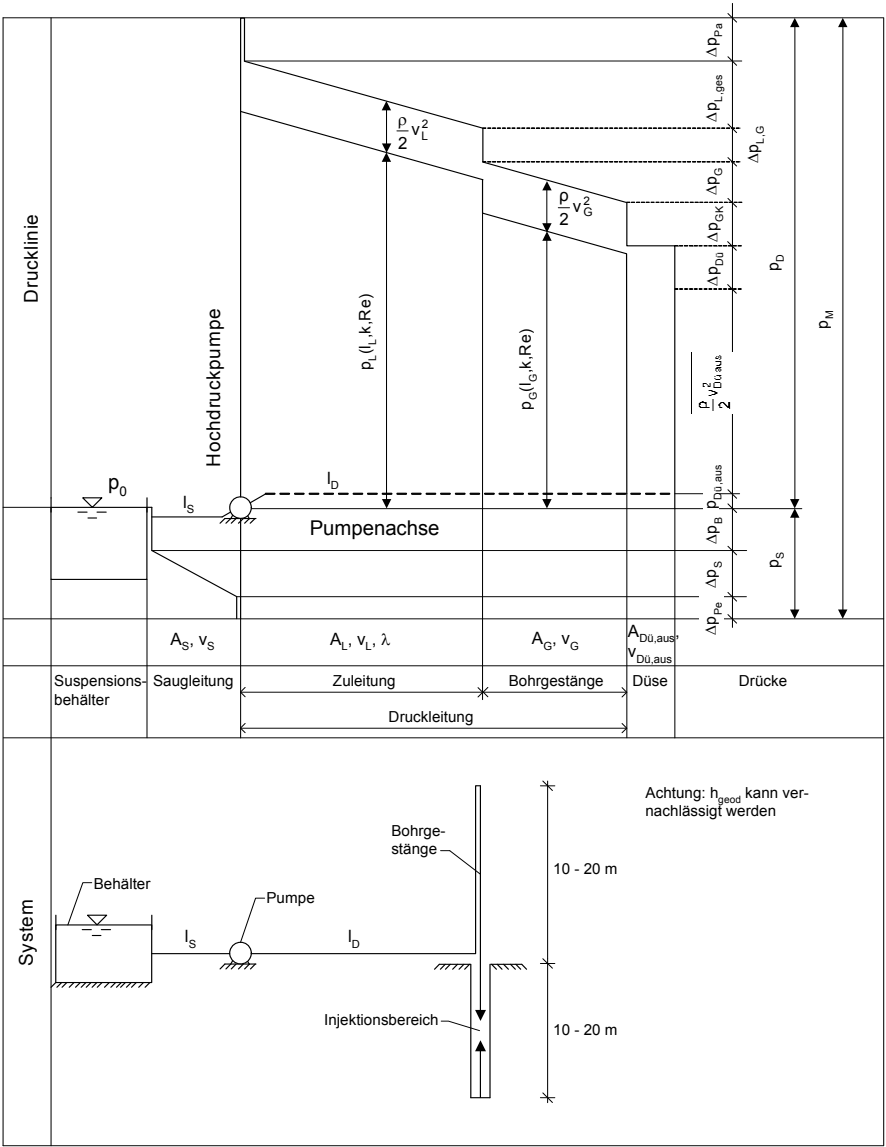


Bild 6-1: Ermittlung des erforderlichen manometrischen Pumpendrucks

Jetgrouting



Saugleitungsdruck p_s [kN/m²]

$$p_s = p_0 + \Delta p_B + \Delta p_s + \Delta p_{Pe} \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$Q_{\text{Suspension}} = A_s \times v_s \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

p_s Druck in der Saugleitung [kN/m²]

p_0 Druck im Suspensionskessel (meist atmosphärisch) [kN/m²]

Δp_B Druckverlust am Austritt aus dem Behälter [kN/m²]

Δp_s Druckverlust in der Saugleitung (siehe „Flüssigkeitsförderung“) [kN/m²]

Δp_{Pe} Druckverlust beim Eintritt in die Pumpe [kN/m²]

A_s Querschnitt der Saugleitung [m²]

v_s Geschwindigkeit in der Saugleitung [m/s]

Druckleitungsdruck p_D [kN/m²]

$$p_D = \Delta p_{Pa} + \Delta p_{L, \text{ges}} + \Delta p_{L/G} + \Delta p_G + \Delta p_{GK} + \Delta p_{Dü} + \frac{\rho}{2} v_{Dü, \text{aus}}^2 + p_{Dü, \text{aus}} \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$Q_{\text{Suspension}} = A_G \times v_G = A_{Dü, \text{aus}} \times v_{Dü, \text{aus}} = A_L \times v_L = A_s \times v_s \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$v_s = \frac{A_{Dü, \text{aus}}}{A_s} v_{Dü, \text{aus}}; \quad v_L = \frac{A_{Dü, \text{aus}}}{A_L} v_{Dü, \text{aus}}; \quad v_G = \frac{A_{Dü, \text{aus}}}{A_G} v_{Dü, \text{aus}};$$

p_D Druck in der Druckleitung [kN/m²]

Δp_{Pa} Druckverlust beim Austritt aus der Pumpe [kN/m²]

$\Delta p_{L, \text{ges}}$ Druckverlust in der Zuleitung von der Pumpe zum Bohrgestänge (siehe „Flüssigkeitsförderung“) [kN/m²]

$\Delta p_{L/G}$ Übergangsverlust Zuleitung – Bohrgestänge [kN/m²]

Δp_G Druckverlust im Injektionsgestänge (siehe Kapitel „Flüssigkeitsförderung“) [kN/m²]

Δp_{GK} Druckverlust durch die Strahlumlenkung (90°) am Fusspunkt des Gestänges in die Düse [kN/m²]

$\Delta p_{Dü}$ Druckverlust durch Querschnittsänderung in der Düse [kN/m²]

$p_{Dü, \text{aus}}$ Austrittsdruck aus der Düse im Bohrloch [kN/m²]

Jetgrouting



A_L	Querschnitt in der Zuleitung	$[m^2]$
v_L	Geschwindigkeit in der Zuleitung	$[m/s]$

Pumpendruck – manometrischer Druck p_M $[kN/m^2]$

$$\Delta p_{L,ges} = \Delta p_L + \frac{\rho}{2} v_{Dü,aus}^2 \left(\frac{A_{Dü,aus}}{A_L} \right)^2 \sum_i \zeta_{L,i} \quad [kN/m^2]$$

$$p_M = p_S + p_D \quad [kN/m^2]$$

$$p_M = p_0 + \Delta p_S + \Delta p_L + \Delta p_G + p_{Dü,aus} + \frac{\rho}{2} v_{Dü,aus}^2 \left\{ \left(\frac{A_{Dü,aus}}{A_S} \right)^2 (\zeta_B + \zeta_{Pe}) + \left(\frac{A_{Dü,aus}}{A_L} \right)^2 \left(\zeta_{Pa} + \sum_i \zeta_{L,i} \right) + \left(\frac{A_{Dü,aus}}{A_G} \right)^2 (\zeta_{L/G} + \zeta_{GK}) + (1 + \zeta_{Dü}) \right\}$$

p_M	Manometrischer Druck	$[kN/m^2]$
Δp_L	Druckverlust durch Rohrreibung in der Zuleitung	$[kN/m^2]$
ζ_B	Verlustbeiwert für den Austritt aus dem Behälter in die Saugleitung	$[-]$
ζ_{Pe}	Verlustbeiwert für den Eintritt in die Pumpe	$[-]$
ζ_{Pa}	Verlustbeiwert für den Austritt aus der Pumpe	$[-]$
$\zeta_{L,i}$	Beiwerte für lokale Verluste in der Zuleitung (z.B. durch Krümmer, Kreisbögen)	$[-]$
$\zeta_{L/G}$	Verlustbeiwert für den Übergang von Zuleitung zum Gestänge (z.B. Querschnittsverengung etc.)	$[-]$
ζ_{GK}	Verlustbeiwert für die Strahlumlenkung (90°) am Fusspunkt des Gestänges in die Düse	$[-]$
$\zeta_{Dü}$	Verlustbeiwert für die Querschnittsveränderung an der Düse	$[-]$

Anmerkung:

Zur Berücksichtigung von Viskosität und ρ_{FF} der Suspension siehe Flüssigkeitsförderung von Flüssigkeits-Feststoff-Gemischen in Kapitel 4.

Jetgrouting



Kolbenpumpendimensionierung

Siehe „Flüssigkeitsförderung“ in Kapitel 4.

Folgende Pumpendrucke sind für die verschiedenen Injektionsverfahren notwendig [2]:

Niederdruckverfahren	chemische Verfestigungen	bis ca.	4 bar
Mitteldruckverfahren	Soilfracturing-Verfahren	bis ca.	100 bar
Hochdruckverfahren	HDI-Verfahren	bis ca.	600 bar
Höchstdruckverfahren	Gesteinszertrümmerung	bis ca.	4000 bar

Die Hochdruckinjektion muss auf folgende Bodenparameter eingestellt werden:

- Druckfestigkeit, E-Modul
- Kohäsion, Scherfestigkeit
- Kornverteilung, Kornaufbau
- Permeabilität, Wassersättigungsgrad

Daraus werden die folgenden Düsenstrahlparameter ermittelt [2]:

- Schneidleistung, Durchflussmenge, Ziehgeschwindigkeit
- Strahlgeschwindigkeit, Druck, Düsenform und -durchmesser
- Reichweite
- Injektionsmedium
- Einwirkzeit
- Rückflussmenge des gelösten Bodens sowie Bohrkopf- und Bohrstängendurchmesser

Die Anwendungsgrenzen des HDI-Verfahrens werden von der maximalen vorhandenen Energie bestimmt. Die Hochdruckinjektionen werden mit Pumpendruck von 300 – 600 bar durchgeführt. Die Düsen haben meist einen Durchmesser von 1.5 – 4.0 mm. Die Strahlgeschwindigkeiten liegen zwischen 150 und 300 m/s. Bei den vorgenannten Anwendungsparametern ist bei Verwendung von Zementsuspensionen ein Energiebedarf von ca. 250 kW notwendig.

Der Einwirkungsbereich des Düsenstrahls hängt ab von:

- der Strahlaustrittsgeschwindigkeit
- der Festigkeit des zu erodierenden Bodens
- dem Entspannungsdruck des abfließenden Rückflussmaterials

Jetgrouting



Eine Verbesserung des Wirkungsradius wird durch Zugabe von Luftdruck (3 – 6 bar) erzielt; dadurch wird das erodierende Bodenmaterial aufgeschäumt und die Penetrationstiefe des Suspensionsstrahls erhöht.

Die Suspensionsmischung hat oft folgende Charakteristik [58]:

- Wasser-Zementfaktor $W/Z = 0.4 - 1.0$
- Zement und Füller 600 – 1000 l
- Rohdichte der Injektionssuspension $\rho = 1.5 - 1.7 \text{ t/m}^3$
- Rohdichte der fertigen Injektionsbodensäule $\rho_{\text{Soilcrete}} = 1.6 - 2.1 \text{ t/m}^3$
- Druckfestigkeit der fertigen Injektionsbodensäule
 $f_{\text{Soilcrete}} = 2 - 15 \text{ N/mm}^2$

Der Durchmesser einer Säule kann empirisch wie folgt bestimmt werden:

Das Volumen des ausgespülten Bodens entspricht der **Durchflussmenge der Rückspülflüssigkeit** $Q_{\text{Rücklauf}}$ $[\text{m}^3/\text{s}]$

$$Q_{\text{Rücklauf}} = \frac{(\rho_{\text{Rücklauf}} - \rho_{\text{S}})}{(\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{Rücklauf}})} \times (Q_{\text{Suspension}}) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Das Volumen des ausgespülten Bodens beim Triplex-Verfahren ergibt sich aus der Berücksichtigung der eingebrachten Volumina von Wasser und Injektionssuspension wie folgt:

$$Q_{\text{Rücklauf}} = \frac{(\rho_{\text{Rücklauf}} - \rho_{\text{S+W}})}{(\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{Rücklauf}})} \times (Q_{\text{Suspension}} + Q_{\text{Wasser}}) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Die **mittlere Rohdichte** $\rho_{\text{S+W}}$ $[\text{t/m}^3]$ der beim Triplex-Verfahren eingebrachten Flüssigkeiten (Wasser und Suspension) ergibt sich zu:

$$\rho_{\text{S+W}} = \frac{(Q_{\text{W}} \times \rho_{\text{W}} + Q_{\text{Suspension}} \times \rho_{\text{S}})}{(Q_{\text{W}} + Q_{\text{Suspension}})} \quad [\text{t/m}^3]$$

Jetgrouting



Ziehgeschwindigkeit und Injektionssäulendurchmesser

$$Q_{\text{Suspension}} \approx Q_{\text{Injektion}} + Q_{\text{Rücklauf}}$$

$$Q_{\text{Injektion}} = Q_{\text{Suspension}} - Q_{\text{Rücklauf}}$$

$$Q_{\text{Injektion}} = Q_{\text{Suspension}} \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{Rücklauf}} - \rho_{\text{S}}}{\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{Rücklauf}}} \right)$$

$$V_{\text{Injektion}} = V_{\text{Boden}} \times \eta_{\text{Füll}}$$

$$Q_{\text{Injektion}} = V_{\text{Injektion}} \times v_{\text{Ziehen}}$$

$$V_{\text{Boden}} = D^2 \times \frac{\pi}{4}$$

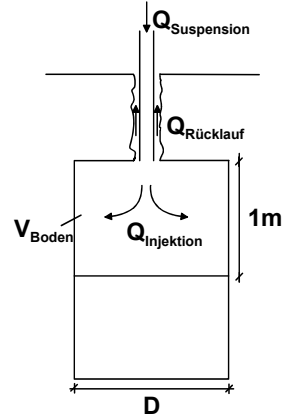


Bild 6-2: Erstellung einer Säule

Ziehgeschwindigkeit v_{Ziehen} [m/s]

$$v_{\text{Ziehen}} = \frac{Q_{\text{Injektion}}}{V_{\text{Injektion}}} = \frac{Q_{\text{Suspension}} \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{Rücklauf}} - \rho_{\text{S}}}{\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{Rücklauf}}} \right)}{D^2 \times \frac{\pi}{4} \times \eta_{\text{Füll}}} \quad [\text{m/s}]$$

Injektionssäulendurchmesser D [m]

$$D = \sqrt{\frac{Q_{\text{Suspension}} \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{Rücklauf}} - \rho_{\text{S}}}{\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{Rücklauf}}} \right)}{v_{\text{Ziehen}} \times \frac{\pi}{4} \times \eta_{\text{Füll}}}} \quad [\text{m}]$$

$Q_{\text{Rücklauf}}$ Durchflussmenge der Rückspülflüssigkeit [m³/s]
 $Q_{\text{Suspension}}$ Durchflussmenge der Suspension (Gesamtmenge) [m³/s]

Jetgrouting



$Q_{\text{Injektion}}$	Suspensionsvolumenstrom, der in das Bodenvolumen V_{Boden} injiziert wird	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Q_{Wasser}	Durchflussmenge des Wassers	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$\rho_{\text{Rücklauf}}$	Dichte der Rückspülflüssigkeit	$[\text{t}/\text{m}^3]$
ρ_{S}	Dichte der Suspension	$[\text{t}/\text{m}^3]$
ρ_{W}	Dichte des Wassers	$[\text{t}/\text{m}^3]$
ρ_{Boden}	Dichte des vorhandenen Bodens	$[\text{t}/\text{m}^3]$
v_{Ziehen}	Ziehgeschwindigkeit des Injektionsgestänges	$[\text{m}/\text{s}]$
$\eta_{\text{Füll}}$	Füllanteil der Zementinjektion am Bodenvolumen (20 – 30 %)	$[\%]$
V_{Boden}	Bodenvolumen der Injektionssäule pro Meter Länge	$[\text{m}^3/\text{m}]$
$V_{\text{Injektion}}$	Suspensionsmenge pro Meter Bodenvolumen der Injektionssäule	$[\text{m}^3/\text{m}]$



6.2 Rammen

Grundrammleistung für Pfähle Q_0 [m/h]

$$Q_0 = \frac{\Delta l_{S,m}}{100} \times n_{\text{Gerät}} \quad [\text{m/h}]$$

Q_0	Grundrammleistung für Pfähle	[m/h]
$\Delta l_{S,m}$	mittlere Eindringtiefe pro Schlag	[cm]
$n_{\text{Gerät}}$	Schläge pro Stunde	[h ⁻¹]

Nutzrammleistung Q_N [m/h]

$$Q_N = Q_0 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{m/h}]$$

$$k_1 = 1 \quad [-]$$

$$k_2 = f_5 \quad [-]$$

$$k_3 = \eta_1 \times \eta_2 \quad [-]$$

Q_N	Nutzrammleistung	[m/h]
Q_0	Grundrammleistung für Pfähle	[m/h]
k_1	nicht massgebend	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]



Schlagrammen

Ermittlung der **erforderlichen Schlagenergie E_{erf} [kNm]** [59]

$E_{\text{vorh}} = m_B \times g \times h$	[kNm]
$E_{\text{erf}} = \frac{F_{\text{dyn}} \times (\Delta l_S(x) + \frac{\Delta_{\text{elast}}}{2})}{\eta_R \times 100}$	[kNm]
$F_{\text{stat}}(x) = A_S \times q_S + A_M(x) \times \tau_M \cong A_S \times q_S + U \times x \times \tau_M$	[kN]
$F_{\text{dyn}} = \frac{F_{\text{stat}}}{\mu_{\text{dyn}}}$	[kN]
$\Delta_{\text{elast}} = F_{\text{dyn}} \times \frac{L}{E_P \times A_S}$	[cm]
$\eta_R = \frac{m_B + k^2 \times m_P}{m_B + m_P}$	[-]

E_{vorh}	Energie des Rammbärs pro Schlag	[kNm]
m_B	Fallmasse des Rammbärs	[t]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Fallhöhe des Rammbärs	[m]
E_{erf}	erforderliche Energie zum Einrammen des Pfahls/ Rammguts	[kNm]
F_{dyn}	dynamischer Eindringwiderstand	[kN]
Δl_S	bleibende Eindringtiefe pro Rammschlag	[cm]
x	Tiefe der Pfahl-/Rammgutspitze	[m]
Δ_{elast}	elastische Deformation des Pfahls/Rammguts	[cm]
η_R	Wirkungsgrad des Rammstosses [0.1 – 0.5]	[-]
F_{stat}	statischer Eindringwiderstand des Rammguts	[kN]
A_S	Querschnittsfläche des Pfahls/Rammguts	[cm ²]
q_S	Grundbruch-/Pfahlspitzenwiderstand	[kN/cm ²]
A_M	Mantelfläche des Pfahls/Rammguts	[m ²]
τ_M	Mantelreibung (Haftreibung) des Pfahls/Rammguts	[kN/m ²]
U	Umfang des Pfahls/Rammguts	[m]
μ_{dyn}	Widerstandsbeiwert des Bodens	[-]
L	Pfahllänge/Rammgutlänge	[cm]
E_P	Elastizitätsmodul des Pfahls/Rammguts	[kN/cm ²]
k	Stossziffer	[-]
m_P	Pfahl-/Rammgutmasse	[t]



Selektion der Schlagramme durch Iteration

Bedingung für die Ermittlung der erforderlichen Schlagenergie bei der Endtiefe des Rammguts:

$\Delta l_S(L) \approx 0$; Iteration für Gerät $i = 1$ bis k :

$$E_{\text{erf},i} = \frac{F_{\text{dyn}} \times (\Delta l_S(L) + \frac{\Delta_{\text{elast}}}{2})}{\frac{m_{B,i} + k^2 \times m_P}{m_{B,i} + m_P} \times 100} = \frac{F_{\text{dyn}}^2 \times (\frac{1}{2} \times \frac{L}{E_P \times A_S})}{\frac{m_{B,i} + k^2 \times m_P}{m_{B,i} + m_P} \times 100} \quad [\text{kJm}]$$

Iterationslauf $i = 1$ bis k :

Für $i = 1$: Annahme eines Rammgeräts mit der Fallmasse $m_{B,1}$

$$E_{\text{erf},i} = \frac{(A_S \times q_S + U \times L \times \tau_M)^2 \times \frac{L}{E_P \times A_S}}{2 \times \mu_{\text{dyn}}^2 \times (m_{B,i} + k^2 \times m_P) \times 100} \times (m_{B,i} + m_P) \quad [\text{kJm}]$$

Bedingung prüfen:

$$E_{\text{erf},i} \leq E_{\text{vorh},i} \Rightarrow m_{B,i} \times g \times h_i$$

wenn

$E_{\text{erf},i} > E_{\text{vorh},i}$ dann $i = i + 1$ mit Geräteparameter der nächsten Leistungsstufe

$m_{B,i+1} \times h_{i+1} > m_{B,i} \times h_i$ bis $i = k$ mit

$$E_{\text{erf},k} \leq E_{\text{vorh},k} = m_{B,k} \times g \times h_k$$

$$\Rightarrow n_{\text{Gerät},k} \quad [\text{h}^{-1}]$$

i	Iterationsschritt	$[-]$
k	maximale Anzahl von Iterationsschritten	$[-]$
$n_{\text{Gerät}}$	Schläge des Rammbärs pro Stunde	$[\text{h}^{-1}]$

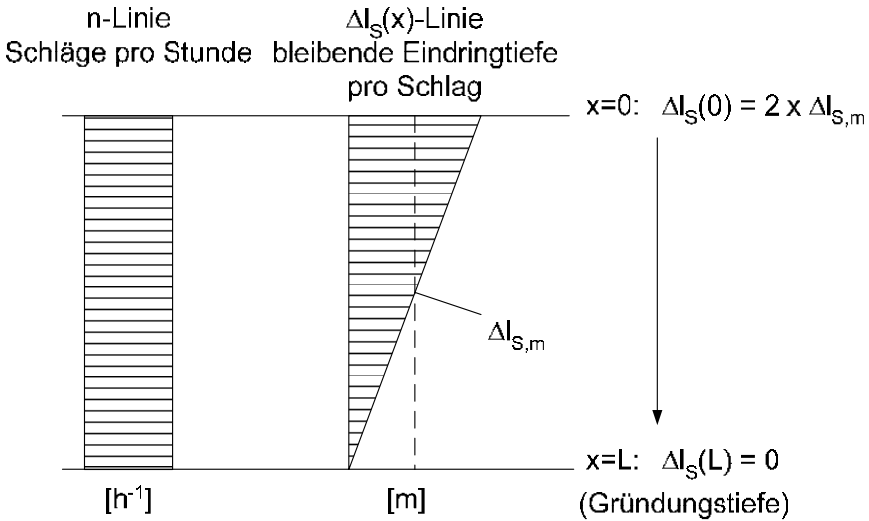


Bild 6-3: Schematische Darstellung der ideellen/statischen Eindringung des Pfahls

Bei Freifall-, Diesel- und Hydraulikbären kann die Ermittlung der **erforderlichen Energie zum Einrammen des Pfahls** E_{erf} durch Iteration der obigen Gleichungen vorgenommen werden. In einem weiteren Schritt kann nun die mittlere bleibende Eindringtiefe $\Delta l_{S,m}$ pro Rammschlag ermittelt werden. Daraus kann dann die Grundrammleistung Q_0 berechnet werden.

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Diesel- bzw. Hydraulikbären eine höhere Energie des Rammbärs E_{vorh} aufweisen als lediglich durch die Gleichung rechnerisch ermittelt. Dies ist bedingt durch die Ausnutzung der Explosionsenergie bzw. des besseren kraftschlüssigen Verbunds zwischen Rammkissen und Pfahl. Auch tragen die ständigen Bewegungen des Systems zur Verringerung der Eindringwiderstände (dynamische statt statische Reibung) bei schnellerer Schlagfrequenz, wie den Diesel- und Hydraulikrammen, und zu einer höheren erreichbaren bleibenden Eindringtiefe pro Rammschlag $\Delta l_{S,m}$ bei.

Rammen



Bestimmung der mittleren Eindringtiefe $\Delta l_{S,m}$ [cm] und der Grundrammleistung Q_0 [m/h]

$$E_{\text{vorh}} = E_{\text{erf}} \quad [\text{kNm}]$$

$$m_B \times g \times h =$$

$$= \frac{\frac{A_S \times q_S + U \times x \times \tau_M}{\mu_{\text{dyn}}} \times \left(\Delta l_S(x) + \left(\frac{A_S \times q_S + U \times x \times \tau_M}{\mu_{\text{dyn}}} \times \frac{L}{2 \times E_P \times A_S} \right) \right)}{\frac{m_B + k^2 \times m_P}{m_B + m_P} \times 100}$$

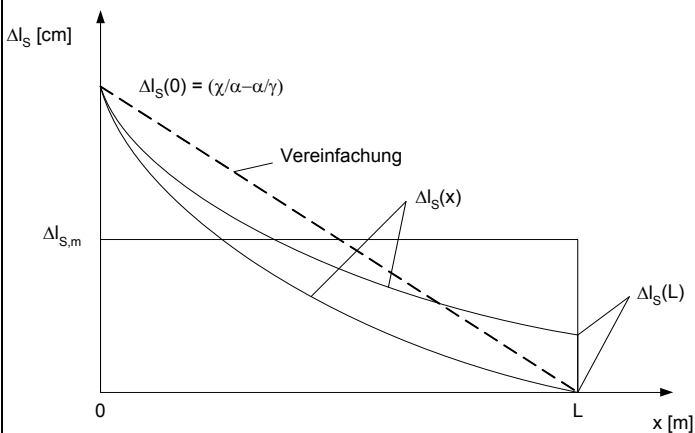
$$\chi = 100 \times m_B \times g \times h \times \eta_R \times \mu_{\text{dyn}}$$

$$\alpha = A_S \times q_S$$

$$\beta = U \times \tau_M$$

$$\gamma = \frac{2 \times E_P \times A_S}{L} \times \mu_{\text{dyn}}$$

$$\Delta l_S(x) = \frac{\left(\chi - \frac{\alpha^2}{\gamma} \right) - x \times \frac{\beta}{\gamma} \times (\beta \times x + 2 \times \alpha)}{x \times \beta + \alpha} \quad \text{mit } 0 \leq x \leq L$$



Rammen



Für $x = 0$: $l_S(0) = 2 \times \Delta l_{S,m}$

$E_{\text{vorh}} =$

$$\frac{A_S \times q_S \times \left(2 \times \Delta l_{S,m} + \frac{q_S \times L}{2 \times \mu_{\text{dyn}} \times E_P} \right) \times (m_B + m_P)}{\mu_{\text{dyn}} \times (m_B + k^2 \times m_P) \times 100} \quad [\text{kNm}]$$

Daraus lässt sich $\Delta l_{S,m}$ ermitteln:

$$\Delta l_{S,m} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{E_{\text{vorh}} \times \mu_{\text{dyn}} \times (m_B + k^2 \times m_P) \times 100}{(m_B + m_P) \times A_S \times q_S} - \frac{q_S \times L}{2 \times \mu_{\text{dyn}} \times E_P} \right) \quad [\text{cm}]$$

Grundrammleistung Q_0 [m/h]

Bei bekannter Schlagzahl $n_{\text{Gerät}} [\text{h}^{-1}]$ des Rammgeräts lässt sich die Grundrammleistung Q_0 berechnen:

$$Q_0 = \frac{\Delta l_{S,m} \times n_{\text{Gerät}}}{100} \quad [\text{m/h}]$$

Die mittlere Schlagzahl pro Pfahl $n_{\text{Pfahl}} [-]$

$$n_{\text{Pfahl}} = \frac{L}{\Delta l_{S,m}} \quad [-]$$

Rammzeit T_R pro Pfahl [h]

$$T_R = \frac{n_{\text{Pfahl}}}{n_{\text{Gerät}}} = \frac{L}{100 \times Q_0} \quad [\text{h}]$$

Rammen



Zeitaufwand pro Pfahl T_{Pfahl} [h]

$T_{\text{Pfahl}} = \sum_i \left(T_R + \frac{T_{\text{Rüst}}}{60} \right)_i$		[h]
$T_{\text{Rüst}} = T_{\text{P,um}} + T_{\text{P,auf}} + T_{\text{P,aus}} + T_{\text{P,verl}}$		[h]
T_{Pfahl}	Zeitaufwand pro Pfahl	[h]
$T_{\text{Rüst}}$	Rüstzeit	[min]
$T_{\text{P,um}}$	Zeit für das Umsetzen des Geräts zum nächsten Rammpfahl	[min]
$T_{\text{P,auf}}$	Zeit für das Aufnehmen des angelieferten Pfahls	[min]
$T_{\text{P,aus}}$	Ausrichten des Pfahls am Mäkler	[min]
$T_{\text{P,verl}}$	Verlängern des Pfahls	[min]

Anzahl der Pfähle pro Tag n_{AT} [AT^{-1}]

$n_{\text{AT}} = \left(\frac{T_{\text{AT}}}{T_{\text{Pfahl}}} \right)$		[AT^{-1}]
n_{AT}	Anzahl der gerammten Pfähle pro Arbeitstag, ganzzahlig aufgerundet	[AT^{-1}]
T_{AT}	Arbeitsstunden pro Arbeitstag	[h/A T]

Gesamtrammzeit T [AT]

$T = n / n_{\text{AT}}$		[AT]
T	Rammzeit für alle Pfähle	[AT]
n	Gesamtanzahl Rammpfähle	[-]

Leistung über die Einsatzzeit Q_{ET} [m/AT]

$Q_{\text{ET}} = n \times L_m / T = \sum_i L_i / T$		[m/AT]
n	Gesamtanzahl Rammpfähle	[-]
L_m	Mittlere Pfahlänge	[m]
L_i	Einzelpfahlänge	[m]

Rammen



Tabelle 6-1: Grundbruch-/Pfahlspitzenwiderstand q_s [kN/cm²] und Mantelreibung τ_M [kN/m²] [59]

Bodenart	Grundbruch-/ Pfahlspitzenwiderstand q_s [kN/cm ²]		Mantelreibung τ_M [kN/m ²]	
	Rechteck- profil	I – Träger- profil	Rechteck- profil	I – Träger- profil
Ton, weich	–	–	15	bis 25
Ton, steif	–	–	30	bis 45
Klei, sandig	–	–	–	bis 50
Mergel, halbfest	–	–	–	bis 55
Feinsand	0.70 – 1.20	0.30 – 0.50	50 – 70	40 – 80
Mittelsand	0.70 – 1.20	0.30 – 0.50	50 – 70	30 – 70
Grobsand	0.45 – 0.65	0.30 – 0.50	40 – 70	30 – 50
Kies	0.70 – 1.25	0.30 – 0.50	50 – 70	30 – 60

Tabelle 6-2: Widerstandsbeiwert μ_{Dyn} [-] des Bodens [58]

Beschreibung des Bodens	Widerstandsbeiwert μ_{Dyn} [-]
gut rammbär	≈ 1.0
mittelmässig rammbär	≈ 0.7
schwierig rammbär	≈ 0.5

Tabelle 6-3: Stossziffer k [-] nach [59]

Bär – Schlaghaube – Pfahlkopf	Stossziffer k [-]
Stahl – Stahl (ohne Schlaghaube)	≈ 0.6
Stahl – Holz – Stahl	≈ 0.5
Stahl – Holz (ohne Schlaghaube)	≈ 0.4
Stahl – Holz - Stahlbeton	≈ 0.3

Rammen

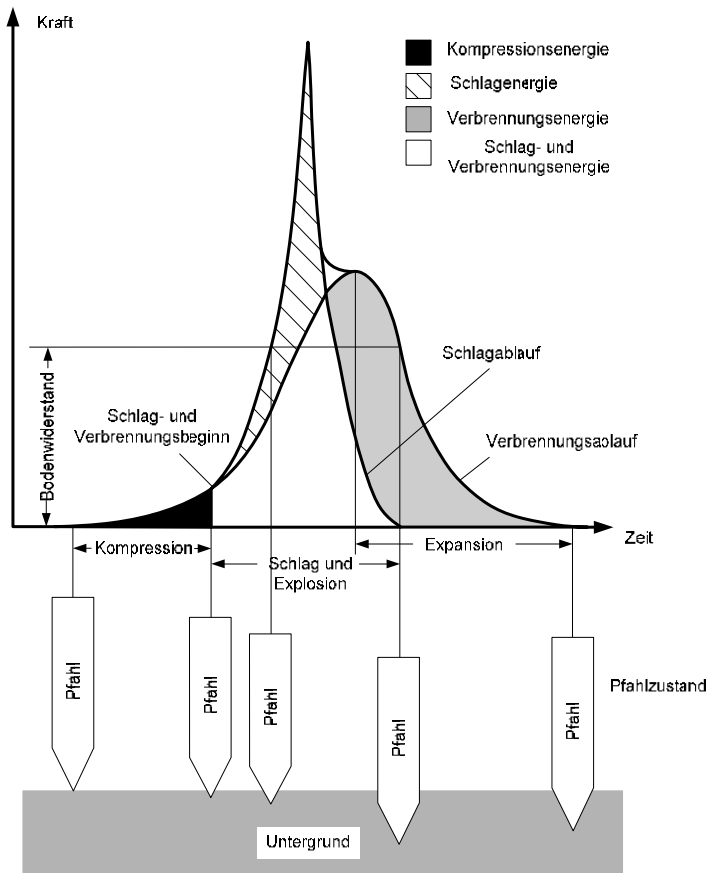


Bild 6-4: Kraft-Zeit-Diagramm für Dieselbären (Explosionsrammen) [61]

Grundrammleistung für Spundbohlen Q_0 [m^2/h]

$$Q_0 = \frac{b \times l}{t} \quad [\text{m}^2/\text{h}]$$

Q_0	Grundrammleistung für Spundbohlen	$[\text{m}^2/\text{h}]$
b	Breite der Spundbohle	$[\text{m}]$
l	Einbindetiefe der Spundbohle	$[\text{m}]$
t	Rammzeit pro Spundbohle	$[\text{h}]$

Rammen



Nutzrammleistung Q_N [m²/h]

$Q_N = Q_0 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[m ² /h]
$k_1 = 1$	[-]
$k_2 = f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]
Q_N	Nutzrammleistung [m/h]
Q_0	Grundrammleistung [m/h]
k_1	nicht massgebend [-]
k_2	Leistungseinflussfaktor [-]
k_3	Betriebsbeiwert [-]
η_1	Bedienungsfaktor [-]
η_2	Betriebsbedingungen [-]
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor [-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad [-]

Der Berechnungsablauf zur Ermittlung von

- Zeitaufwand pro Spundbohle
- Anzahl der gesetzten Spundbohlen pro Tag
- Gesamtrammzeit
- Leistung über die Einsatzzeit

kann vom vorigen Kapitel „Rammen von Rammpfählen“ übernommen werden.



Vibrationsrammen

Prinzip der wirkenden **Fliehkräfte F [kN] einer Vibrationsramme mit mehreren Unwuchten**

Kräfte einer Unwucht:

$$F_i = m_i \times \omega^2 \times r \quad [\text{kN}]$$

mit

$$\omega = 2 \times \pi \times f \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}]$$

$$a = \omega^2 \times r \quad [\text{m/s}^2]$$

$$F_{i,V} = m_i \times \omega^2 \times r \times \sin \varphi \quad [\text{kN}]$$

$$F_{i,H} = m_i \times \omega^2 \times r \times \cos \varphi \quad [\text{kN}]$$

F_i	Fliehkraft einer Unwucht i	[kN]
m_i	Masse der Unwucht i	[t]
ω	Kreisfrequenz der Unwucht	[s ⁻¹]
r	Abstand des Massenschwerpunktes der Unwucht i von der Auflagerung	[m]
f	Frequenz der Vibrationsramme/Unwucht	[Hz]
T	Umlaufzeit der Unwucht	[s]
a	radiale Beschleunigung	[m/s ²]
φ	Winkel der Unwuchtstellung	[°]
$F_{i,V}$	vertikaler Anteil der Fliehkraft einer rotierenden Unwucht i	[kN]
$F_{i,H}$	horizontaler Anteil der Fliehkraft einer rotierenden Unwucht i	[kN]
i	Bezeichnung der Unwucht i	[-]

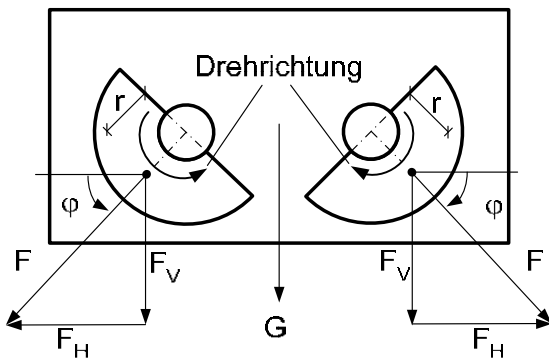
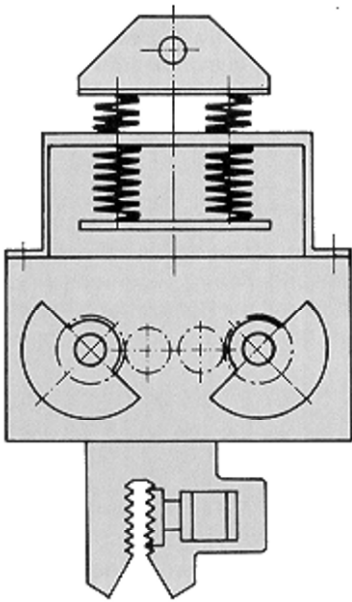


Bild 6-5: Vibrationsramme und wirkende Kräfte nach [62]

Rammen



Dynamische Größen der Vibrationsramme

Summe der Unwuchtkräfte:

$$F_{VZ} = \sum_{i=1}^n F_{i,V} = \sum_{i=1}^n m_i \times r_i \times \omega^2 \times \sin \varphi = M_{\text{stat}} \times \omega^2 \times \sin \varphi \quad [\text{kN}]$$

$$M_{\text{stat}} = \sum_{i=1}^n m_i \times r_i \quad [\text{tm}]$$

$$F_{HZ} = \sum_{i=1}^n F_{i,H} = 0 \quad [\text{kN}]$$

Gesamte vertikale Kraft des Rammbärs:

$$\begin{aligned} F_{V,\text{tot}} &= G + F_{VZ} = m_{\text{Bär}} \times g + \sum_{i=1}^n m_i \times r_i \times \omega^2 \times \sin \varphi \\ &= m_{\text{Bär}} \times g + M_{\text{stat}} \times \omega^2 \times \sin \varphi \end{aligned} \quad [\text{kN}]$$

Dynamische Masse des Rammsystems:

$$m_{\text{dyn}} = m_{\text{Bär}} + m_{\text{Rammgut}} + m_{\text{Boden}} \quad [\text{t}]$$

$$m_{\text{Boden}} = f(\varphi'; c'; \gamma'; w) \quad [\text{t}]$$

Effektive Beschleunigung der Rammmassen:

$$a_{\text{max}} = \omega^2 \times r = \omega^2 \times \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times r_i}{m_{\text{dyn}}} \quad [\text{m/s}^2]$$

für $r_i = r = \text{const.}$ gilt

$$a_{\text{max}} = \omega^2 \times r \times \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m_{\text{dyn}}} \quad [\text{m/s}^2]$$

F_{VZ}	Summe der vertikalen Anteile der Fliehkräfte	[kN]
$F_{i,V}$	vertikaler Anteil der Fliehkraft einer rotierenden Unwucht i	[kN]
m_i	Masse der Unwucht i	[t]
r_i	Abstand des Massenschwerpunktes der Unwucht i vom Auflager	[m]
ω	Kreisfrequenz der Vibrationsramme	[s ⁻¹]

Rammen



φ	Winkel der Unwuchtstellung	[°]
M_{stat}	statisches Moment der Vibrationsramme	[tm]
F_{HZ}	Summe der horizontalen Anteile der Fliehkräfte	[kN]
$F_{i,H}$	horizontaler Anteil der Fliehkraft einer rotierenden Unwucht i	[kN]
$F_{V,\text{tot}}$	Summe aller vertikal wirkenden Kräfte	[kN]
G	Eigengewicht der Vibrationsramme	[kN]
$m_{\text{Bär}}$	Masse der Vibrationsramme	[t]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
m_{dyn}	dynamische Masse des Rammsystems	[t]
m_{Rammgut}	Masse des Rammgutes	[t]
m_{Boden}	Masse des mitschwingenden Bodens	[t]
φ'	Reibungswinkel des Bodens	[°]
c'	Kohäsion des Bodens	[kN/m ²]
γ'	Spezifisches Gewicht des Bodens	[kN/m ³]
w	Wassergehalt des Bodens	[%]
a_{max}	effektive Beschleunigung	[m/s ²]
i	Bezeichnung der Unwucht	[-]
n	Anzahl der Unwuchtmassen	[-]
	$n = \{ n \mid n = 2 \times m; m \in \mathbb{N} \}$	



Selektion der Vibrationsramme

Erforderliche vertikale Fliehkraft $F_{VZ,erf}$ [kN] der Vibrationsramme aus Bsp: Zum
 Rammen eines Rammgutes mit 4.5 t Gewicht ist bei einer Eindringtiefe von 30 m sowie dicht gelagerten Sanden und Kiesen eine vertikale Fliehkraft von ca. 2280 kN erforderlich.

Bild 6-6:

$$F_{VZ,erf} = \left\{ \begin{array}{l} I_{max}, m_{Rammgut} \\ (q_S^{dyn} \times A_S + \tau_M \times A_M) \Rightarrow \text{Rammbarkeit} = I \div IV \end{array} \right\} \quad [\text{kN}]$$

Erforderliche Mindesteigenfrequenz ω_{erf} der Vibrationsramme aus Tabelle 6-4:

$\omega_{erf} = f(\text{Bodenart})$

Bestimmung der Vibrationsramme – Iterationsablauf $i=1$ bis k

Iterationsschritt i :

Gerätewahl i mit: $M_{Stat,i}$ und $\omega_i > \omega_{erf}$

Ermittlung der vorhandenen maximalen Unwuchtkräfte mit

$\varphi = 90 \Rightarrow \sin \varphi = 1$:

$$F_{VZ,i} = M_{Stat,i} \times \omega_i^2$$

$$\omega_{erf,i} = \sqrt{\frac{F_{VZ,erf}}{M_{stat,i}}}$$

Bedingungen prüfen:

$$F_{VZ,erf} \leq F_{VZ,i} \wedge \omega_i > \omega_{erf,i}$$

falls: $F_{VZ,i} < F_{VZ,erf} \wedge \omega_i > \omega_{erf,i}$ oder
 $F_{VZ,i} < F_{VZ,erf} \wedge \omega_i < \omega_{erf,i}$ oder
 $F_{VZ,i} > F_{VZ,erf} \wedge \omega_i < \omega_{erf,i}$ dann nächste Iteration $i=i+1$

Letzte Iteration $i=k$

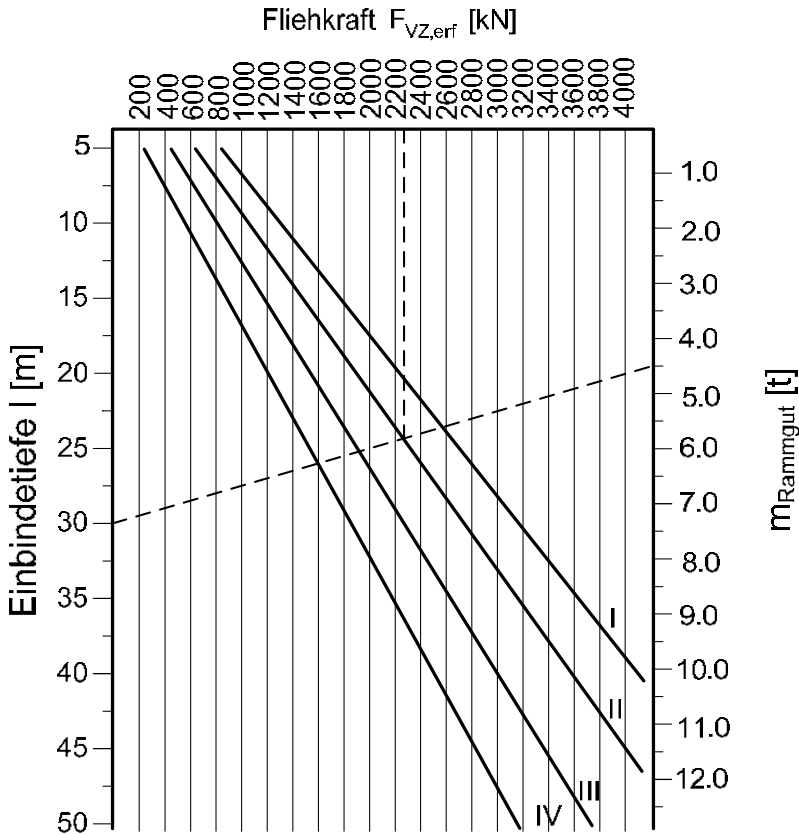
falls: $F_{VZ,k} > F_{VZ,erf} \wedge \omega_i > \omega_{erf,i}$

Rammen



$F_{VZ,erf}$	Erforderliche vertikale Fliehkraft der Vibrationsramme, um das Rammgut in die spezifischen Böden einzubringen (s. Bild 6-6)	[kN]
ω_{erf}	Eigenfrequenzbereiche der Böden bzw. erforderlicher Kreisfrequenzbereich der Vibrationsramme (s. Tabelle 6-4)	[min ⁻¹]
i	Iterationsschritt	[-]
k	Letzter Iterationsschritt	[-]
$M_{Stat,i}$	Statisches Moment der Vibrationsramme i	[tm]
ω_i	Maximale Eigenfrequenz der Vibrationsramme i (Eigenfrequenzbereich)	[min ⁻¹]

Für einen optimalen Rammvorgang sollte die Frequenz der Vibrationsramme im Bereich nahe der Eigenfrequenz des Bodens gewählt werden.



Kurve	Rammpflicht	Sand- und Kies- lagerung	bindige und schluffige Böden
I	sehr schwer	sehr dicht	sehr hart
II	schwer	dicht	hart
III	mittelschwer	mittel	plastisch
IV	leicht	locker	weich

Bsp: Zum Rammen eines Rammgutes mit 4.5 t Gewicht ist bei einer Eindringtiefe von 30 m sowie dicht gelagerten Sanden und Kiesen eine vertikale Fliehkraft von ca. 2280 kN erforderlich.

Bild 6-6: Diagramm zur Bestimmung der erforderlichen vertikalen Fliehkraft $F_{V,erf}$ [61]

Rammen



Tabelle 6-4: Eigenfrequenzen ausgesuchter Bodenarten nach [59]

Bodenart	f [Hz]	ω [min ⁻¹]
Moorboden	10 – 13	3800 – 4900
Mittelsand	15 – 18	5650 – 6800
Lehmiger Boden	21 – 23	7900 – 8700
Lehm feucht	19 – 20	7150 – 7550
Lehm trocken	20 – 22	7550 – 8300
Sand fest	26 – 28	9800 – 10550
Schluffsand	19 – 20	7200 – 7550
Löss trocken	23 – 24	8700 – 9050

Funktionsweise von Vibrationsrammen: Herkömmliche und Vibrationsrammen mit variabler, computergesteuerter Fliehkraft.

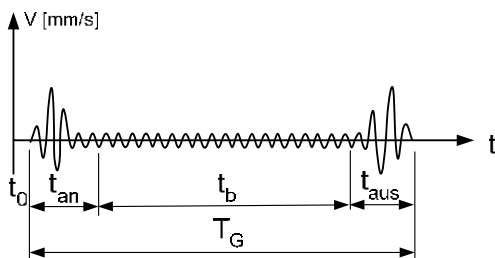


Bild 6-7: Herkömmliche Vibrationsrammen

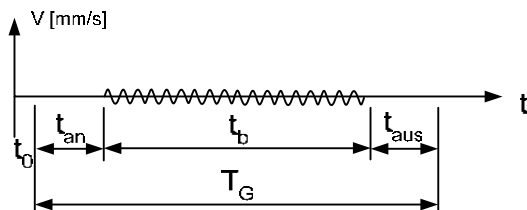


Bild 6-8: Vibrationsrammen mit variabler Fliehkraft

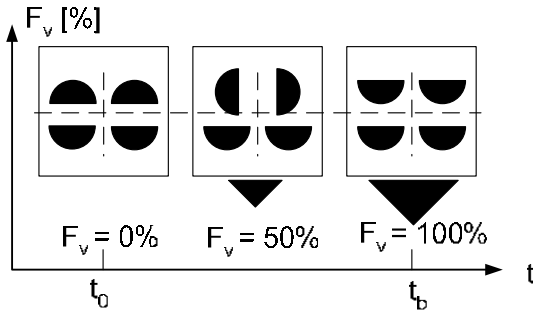


Bild 6-9: Variable vertikale Fliehkraft – Prinzip der Unwuchtstellung

Legende zu Bild 6-7, Bild 6-8 und Bild 6-9:

t_{an} – Anlaufphase

t_b – Betriebsphase;

t_{aus} – Auslaufphase

T_G – Gesamtbetriebszeit

7 Hochbau

Krane

Betonanlagen

Stahlbetonarbeiten

Krane



7.1 Krane

Theoretische Leistung Q_T [t/h] und Nutzleistung Q_N [t/h] von Kranen

$Q_T = \frac{(m_{\max} - m_0) \times 3600}{t_s}$	[t/h]
$Q_N = Q_T \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[t/h]
$M \leq m_{\max} - m_0$	[t]
$k_1 = 1$	[-]
$k_2 = f_2 \times f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]

Q_T	theoretische Leistung	[t/h]
Q_N	Nutzleistung/Dauerleistung	[t/h]
$m_{\max}$	zulässige Hubmasse	[t]
m_0	Masse der Lasthalterung (Haken-, Betonkübelgewicht etc.)	[t]
M	geförderte Menge (maximal: $m_{\max} - m_0$)	[t]
t_s	Grundspielzeit	[s]
f_2	Hebe- und Absetzgenauigkeit	[-]
f_5	Gerätezustandsfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen	[-]
k_1	Ladefaktor	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad (0.5 – 0.85)	[-]

Krane

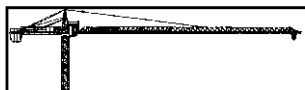


Tabelle 7-1: Anhaltswerte zur Ermittlung der Grundspielzeit t_s [s] nach [63]

Zeit	Einheit	Bewegung	Wert
t_H	[s/m]	Hub- bzw. Senkzeit des Hakens	1 – 20
t_{sch}	[s/°]	Schwenkzeit des Krans	0.1 – 0.2
t_K	[s/m]	Fahrzeit der Laufkatze	1 – 3
t_A	[s]	Zeit für das Anhängen der Last bzw. Füllen des Betonkübels	30 – 180
t_E	[s]	Zeit für das Entleeren des Kübels bzw. Abhängen von Lasten	30 – 180

Die Grundspielzeit t_s [s] ergibt sich je nach Einsatzbedingungen aus sequentiellen und parallelen Vorgängen.

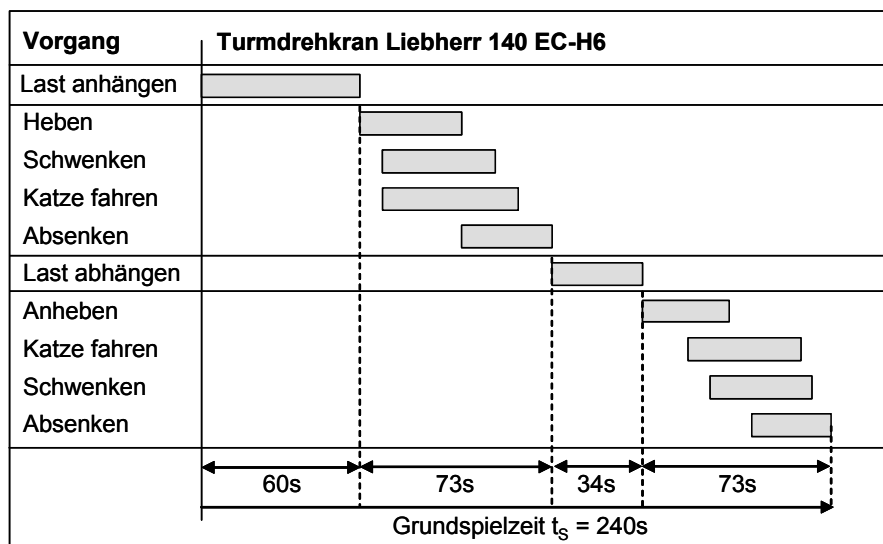


Bild 7-1: Beispiel für eine Grundspielzeit t_s [s] des Turmdrehkrans 140 EC-H6 von Liebherr

Krane



Tabelle 7-2: Richtwerte zur Abschätzung: Anzahl Arbeitskräfte/Kran
[18], [63], [64]:

Bauwerkstyp	Beschäftigte pro Kran
Mauerwerksbau	15
Betonbau, Betonieren mittels Rohrförderung	20 – 30
Betonbau, Betonieren mit Kran	15 – 20
Fertigteilmontage	3 – 5

Richtwerte zur Abschätzung: Kranförderleistung im Hochbau – Baustoffbedarf/ m^3 -Bruttogebäuderauminhalt [63]:

Tabelle 7-3: Richtwerte zur Abschätzung der Kranförderleistung im Hochbau [63], [64]:

Baustoffbedarf pro m^3 -Bruttogebäuderauminhalt	0.35 – 0.65 t
durchschnittliche Förderleistung	300 – 500 t/(Schicht u. Monat)

Tabelle 7-4: Kranaufwandswerte [63]

Vorgang	Aufwand
Konventionelle Deckenschalung	0.02 – 0.09 h/ m^2
Deckenschaltische	0.02 – 0.03 h/ m^2
Stützenschalung	0.02 – 0.05 h/ m^2
Grossflächige Wandschalung	0.04 – 0.08 h/ m^2
Bewehrung – Matten	0.30 – 0.60 h/t
Bewehrung – Stabstahl	0.20 – 0.35 h/t
Fertigteilplatten	0.15 – 0.20 h/St.
Fertigteilstützen	0.50 – 0.90 h/St.
Fundamente betonieren	0.05 – 0.09 h/ m^3
Wände betonieren	0.08 – 0.15 h/ m^3
Stützen betonieren	0.15 – 0.35 h/ m^3
Decken betonieren	0.06 – 0.12 h/ m^3
Mauerwerksbau	0.15 – 0.25 h/ m^3



7.2 Betonanlagen

Betonmischer

$Q_N = V_N \times n \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[fm ³ /h]
$Q_0 = V_N \times n$	[fm ³ /h]
$\tilde{Q}_0 = V_N \times n \times k_V$	[lm ³ /h]
$\tilde{Q}_N = V_N \times n \times k_V \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$	[lm ³ /h]
$V_{N,lose} = V_N \times k_V$	[lm ³ /h]
$k_V = \frac{1}{\delta_{Bet,i}}$	[-]
$(f_1; f_2; f_3; f_4) = 1$	[-]
$k_2 = f_5$	[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$	[-]

V_N	Nenninhalt des Mixers $\triangleq$ Volumen des mit einem Arbeitsspiel herstellbaren Frischbetons im verdichteten Zustand (Verdichtungsmaß 1.45) [65]	[fm ³]
$V_{N,lose}$	Volumetrischer Inhalt des Mixers in losem Zustand	[lm ³]
Q_0	Grundmischleistung verdichteter Beton	[fm ³ /h]
Q_N	Nutzmischleistung verdichteter Beton	[fm ³ /h]
$\tilde{Q}_0$	Grundmischleistung unverdichteter Beton	[lm ³ /h]
$\tilde{Q}_N$	Nutzmischleistung unverdichteter Beton	[lm ³ /h]
n	Spiele pro Stunde	[h ⁻¹]
$\delta_{Bet,i}$	Verdichtungsmaß (Tabelle 7-5)	[fm ³ /lm ³]
f_5	Gerätezustandsfaktor	[-]
η_1	Bedienungsfaktor	[-]
η_2	Betriebsbedingungen im Verladebereich auf den Transporter	[-]
k_V	Ladefaktor des Mixers	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad	[-]

Betonanlagen



Anzahl der Arbeitsspiele pro Stunde n [h^{-1}] [3]:

- Trommelmischer < 20
- Zwangsmischer < 30

Tabelle 7-5: Verdichtungsfaktor $\delta_{\text{Bet},i}$ [-] [66]:

$\delta_{\text{Bet},i}$	Bezeichnung	Ausbreitmass
$\delta_{\text{Bet},i} \leq 0.83$	steifer Beton	---
$\delta_{\text{Bet},i} = 0.83 - 0.93$	plastischer Beton	35 – 41 cm
$\delta_{\text{Bet},i} = 0.93 - 0.98$	weicher Beton	42 – 48 cm
$\delta_{\text{Bet},i} \approx 1$	fliessfähiger Beton	49 – 60 cm

Geräteausnutzungsgrad η_G [-]

$$\eta_G = 0.8 - 0.9$$



Betonpumpen

$P = \frac{\tilde{Q}_T \times p}{36 \times \eta_W}$		[kW]
$\tilde{Q}_0 = \tilde{Q}_T \times \varphi_k$		[m³/h]
$\tilde{Q}_N = \tilde{Q}_T \times \varphi_k \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$		[m³/h]
$Q_N = \tilde{Q}_T \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$		[fm³/h]
$Q_N = \tilde{Q}_0 \times \delta_{\text{Bet},i} \times k_2 \times k_3 \times \eta_G$		[fm³/h]
$k_1 = \delta_{\text{Bet},i} \times \varphi_k$		[-]
$(f_1; f_4) = 1$		[-]
$k_2 = f_2 \times f_3 \times f_5$		[-]
$k_3 = \eta_1 \times \eta_2$		[-]
P	Pumpenleistung (Motor)	[kW]
$\tilde{Q}_T$	theoretische, volumetrische Förderleistung – unverdichteter Beton	[m³/h]
$\tilde{Q}_0$	Grundförderleistung (unverdichteter Beton unter Berücksichtigung der Kolbenfüllung)	[m³/h]
$\tilde{Q}_N$	Nutzförderleistung – unverdichteter Beton	[m³/h]
Q_N	Nutzförderleistung – verdichteter Beton	[fm³/h]
p	massgebender Betondruck an der Betonpumpe	[bar]
η_W	Wirkungsgrad der Pumpe (~ 0.7)	[-]
$\delta_{\text{Bet},i}$	Verdichtungsfaktor des Betons (Tabelle 7-5)	[-]
φ_k	Kolbenfüllungsgrad	[-]
f_2	Beschickung des Trichters 3/4 bis voll: $f_2 = 1$ 1/2 bis 3/4: $f_2 = 0.8$	[-]
f_3	Entleerungsgenauigkeit/Umsetzhäufigkeit des Betonverteilerschlauchs: Decke: $f_3 = 1$ kleine Stützen: $f_3 = 0.5 - 0.7$ Wände: $f_3 = 0.7 - 1.0$	[-]
f_5	Gerätezustandsfaktor ≈ 1	[-]
η_1	Bedienungsfaktor am Betonverteilerschlauch (Mensch)	[-]

Betonanlagen



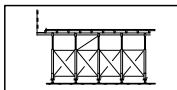
η_2	Betriebsbedingungen am Betonverteilerschlauch	[-]
k_1	Beladungsfaktor der Pumpe	[-]
k_2	Leistungseinflussfaktor (Beschickung)	[-]
k_3	Betriebsbeiwert	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad (z.B. durch effektiven Betrieb der Pumpe von nur 45 min/h: 0.75)	[-]

Tabelle 7-6: Grenzwerte von Betonpumpen

Förderleistung von Betonpumpen	140 m ³ /h
Förderweite	1200 m
Förderhöhe	450 m



Stahlbetonarbeiten



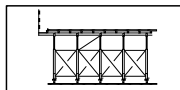
7.3 Stahlbetonarbeiten

Zur Berechnung der Leistung bei Stahlbetonarbeiten muss man die Aufwandswerte für die Arbeitsgänge Schalen, Bewehren und Betonieren systematisch ermitteln. Eine mögliche Einteilung der Arbeitsgänge in weitere Tätigkeiten ist in Bild 7-3 dargestellt. Die Aufwandswerte für die einzelnen Tätigkeiten können der Fachliteratur [68] entnommen werden bzw. sind bei den Kalkulationsabteilungen der Baufirmen intern vorhanden.

	Arbeitsgänge	Tätigkeiten
Stahlbetonarbeiten	Schalen	Vorbereitung
		Einschalen
		Ausschalen
		Nachbehandlung
	Bewehren	Vorfertigung
		Einbau
	Betonieren	Mischen
		Einbringen
		Verdichten
		Oberflächenbehandlung

Bild 7-3: Einteilung der Arbeitsgänge und Tätigkeiten von Stahlbetonarbeiten

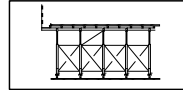
Stahlbetonarbeiten



Der reale Gesamtstundenaufwand wird auf Basis des theoretischen Gesamtstundenaufwands unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren bestimmt.

Realer und theoretischer Gesamtstundenaufwand [h]

$T_{N,k} = \frac{1}{k_2} \cdot \frac{1}{k_3} \cdot \frac{1}{\eta_G} \cdot T_{T,k}$		[h]
$T_{N,k}$	Realer Gesamtstundenaufwand des Arbeitsvorganges k	[h]
$T_{T,k}$	Theoretischer Gesamtstundenaufwand des Arbeitsvorganges k	[h]
k_2	Technische Abminderungsfaktoren z.B. Alter der Schalung	[-]
k_3	Betriebsbeiwert mit η_1 = Bedienungsfaktor (Qualifikation der Arbeiter) η_2 = Betriebsfaktor (AVOR, Wetter, Platzverhältnisse)	[-]
η_G	Geräteausnutzungsgrad (Konzentration, Nebenarbeiten, Zigarettenpausen)	[-]
k	Arbeitsvorgänge: k = S: Schalen k = A: Bewehrungseinbau k = Bet: Betonarbeiten	[-]



Schalungstechnik

Theoretischer Gesamtstundenaufwand zum Schalen $T_{T,S,1}$ [h]

$$T_{T,S,1} = \sum_j \left(\sum_i a_{Si,j} \times A_j \right) + \sum_k (a_{Z,k} \times Z_k) \quad [h]$$

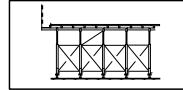
$T_{T,S,1}$	Theoretischer Gesamtstundenaufwand des Ein- und Ausschalens	[h]
$a_{Si,j}$	Aufandswert für die einzelnen Tätigkeiten i, für Systemschalungen: i = e: Einschalen und Ölen i = a: Ausschaln und Reinigen	[h/m ²]
A_j	Fläche des geschalteten Bauteils	[m ²]
$a_{Z,k}$	Zuschlag für Sonderarbeiten (Ecken, Aussparungen, Beischalarbeiten etc.)	[h/LE]
Z_k	Leistungseinheiten für die Sonderarbeit, z.B. LE = m ² , LE = Stück etc.	[LE]
j	unterschiedliche Schalbereiche, z.B. Unterzüge, Hauptdeckenflächen oder Wände und Stützen.	[-]
k	Sonderarbeiten	[-]

Theoretischer Gesamtaufwand zur Schalungsvorbereitung und Demontage $T_{T,S,2}$ [h]

$$T_{T,S,2} = \sum_i a_{V,i} \times A_S \quad [h]$$

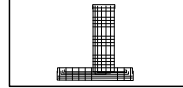
$T_{T,S,2}$	Theoretischer Gesamtaufwand zur Schalungsvorbereitung/Demontage	[h]
$a_{V,i}$	Aufandswert zur Montage bzw. Demontage der Schalung als Grosselemente, Deckentische etc.	[h/m ²]
i	i = M: Montage/Zusammenbau i = D: Demontage	[-]
A_S	Fläche der vorbereiteten bzw. demontierten Schalung	[m ²]

Stahlbetonarbeiten



Theoretischer Gesamtstundenaufwand für die Schalungsarbeiten $T_{T,S}$ [h]

$T_{T,S} = T_{T,S,1} + T_{T,S,2}$		[h]
$T_{T,S}$	Theoretischer Gesamtstundenaufwand für die Schalungsarbeiten	[h]
$T_{T,S,1}$	Theoretischer Gesamtaufwand des Einschalens und Ausschalens	[h]
$T_{T,S,2}$	Theoretischer Gesamtaufwand zur Schalungsvorbereitung/Demontage	[h]



Bewehrungsseinbau

Theoretischer Gesamtstundenaufwand zum Einbau der Bewehrung auf der Baustelle für ein Bauteil oder Bauwerk $T_{T,A}$ [h]

$$T_{T,A} = \sum_j T_{T,A,j} \quad [h]$$

Theoretischer Gesamtstundenaufwand für Bewehrungsarbeiten des Durchmessers j :

$$T_{T,A,j} = (a_{A,b} + a_{A,ab} + a_{A,v})_j \times m_{A,j} + a_R \times A_S \quad [h]$$

$$T_{T,A,j} = (\sum_i a_{A,i})_j \times m_{A,j} + a_R \times A_S \quad [h]$$

$$m_{A,j} = \frac{l_j \times g_{A,j}}{1000} \quad [t]$$

$T_{T,A}$	Theoretischer Gesamtaufwand zum Einbau der Bewehrung für ein Bauteil oder Bauwerk	[h]
$T_{T,A,j}$	Theoretischer Gesamtaufwand zum Einbau der Bewehrung $\emptyset = j$	[h]
$a_{A,i}$	Aufwandswert für die Tätigkeiten beim Einbau der Bewehrung, Tätigkeit: $i = b$: Biegen $i = ab$: Abladen $i = v$: Verlegen	[h/t]
$m_{A,j}$	Masse der einzubauenden Bewehrung eines bestimmten Durchmessers $\emptyset = j$	[t]
a_R	Aufwandswert für Reinigung der Schalung vor dem Betonieren	[h/m ²]
A_S	Schalungsfläche	[m ²]
l_j	Gesamtlänge der Bewehrung des Durchmessers $\emptyset = j$	[m]
$g_{A,j}$	Masse der Bewehrung eines Durchmessers $\emptyset = j$ pro m	[kg/m]
j	Durchmesser $\emptyset$ der Bewehrung	[mm]

Stahlbetonarbeiten



Theoretischer Gesamtstundenaufwand zum Einbau von Spanngliedern auf der Baustelle $T_{T,Sp}$ [h]

$$T_{T,Sp} = \sum_j T_{T,Sp,j} \quad [h]$$

Theoretischer Gesamtstundenaufwand für den Spanngliedereinbau des Typs j:

$$T_{T,Sp,j} = \left(\sum_i a_{Sp,i} \right)_j \times l_{Sp,j} + \sum_k a_{Sp,k} \times n \quad [h]$$

$T_{T,Sp}$	Theoretischer Gesamtstundenaufwand zum Einbau der Spannglieder in ein Bauteil oder Bauwerk	[h]
$T_{T,Sp,j}$	Gesamtaufwand zum Einbau der Spannglieder des Typs j	[h]
$a_{Sp,i}$	Aufwandswert für den Einbau der Spannglieder, Tätigkeiten: i = h: Hüllrohr und Anker verlegen i = l: Litzen einschiessen	[h/m]
$l_{Sp,i}$	Länge der Spannstähle des Typs j	[m]
$a_{Sp,k}$	Aufwandswert für Tätigkeiten: k = v: Vorspannen k = p: Verpressen k = a: Anker einbetonieren	[h/Stk]
n	Anzahl der Spannglieder	[-]
j	Spannglied Typ	[-]

Stahlbetonarbeiten



Für die Berechnung des Stundenaufwands für Bewehrungsarbeiten ist es notwendig, zuvor die Bewehrungsarbeiten systematisch und auf das Bauwerksteil bezogen zu untergliedern. In einem zweiten Schritt sind die Aufwandswerte aus gängigen Katalogen zu entnehmen oder Erfahrungswerte zu nutzen und in die Formel einzusetzen.

Richtung	Bauteil	Form	Grad der Vorfertigung
horizontal	- Platten	flächig	- Teppichbewehrung - konventionell
	Fundamente - Einzel	Korb	- Korb-/Balken- bewehrung - konventionell
	Decken	flächig	- Teppichbewehrung - konventionell
	Unterzüge	stab- förmig	- vorgefertigt - konventionell
	Anschlussbewehrungen für Wände, Stützen etc.		- konventionell
vertikal	Wände	flächig	- Matten, vorgefertigt - konventionell
	Stützen	stab- förmig	- vorgefertigt - konventionell
	Anschlussbewehrung für Decken, Wände		- konventionell

Bild 7-4: Systematische Untergliederung von Armierungsarten



Betonarbeiten

Theoretischer Gesamtstundenaufwand für Betonarbeiten $T_{T,Bet}$ [h]

$T_{T,Bet} = T_{T,R} + \sum_j (a_{Bet,j} \times V_{Bet,j} + \sum_i a_{Zu,i,j} \times A_{Bet,i,j})$			[h]
$T_{T,Bet}$	Theoretischer Gesamtstundenaufwand für Betonarbeiten		[h]
$T_{T,R}$	Theoretische Rüstzeit für die Betonierarbeiten (Verlegen der Pumpleitung/Kübel an Kran anhängen bzw. reinigen, Anschluss Rüttler etc.)		[h]
$a_{Bet,j}$	Aufwandswert für den Einbau des Betons im Bauteil j		[h/m ³]
$V_{Bet,j}$	Gesamtbetonvolumen des Bauteils j		[m ³]
$a_{Zu,i,j}$	Zusatzaufwand für Oberflächenbehandlung, Tätigkeiten: i = g : Abgleichen der Betonhöhe i = z : Abziehen der Oberfläche i = r : Abreiben/Glätten der Oberfläche		[h/m ²]
$A_{Bet,i,j}$	Oberfläche des nachzubearbeitenden Betons des Bauteils j		[m ²]

Stahlbetonarbeiten



Die **reale Dauer der einzelnen Arbeitsvorgänge** $D_{N,k}$ [h] kann anhand der Gruppen- oder Kolonnenleistungen hergeleitet werden:

Dauer der Arbeitsvorgänge:

$$D_{N,k} = \frac{T_{N,k}}{n} = \frac{m_{LE}}{q_{N,Grup}} \quad [h]$$

$D_{N,k}$	Reale Dauer der Arbeitsgänge k	[h]
$T_{N,k}$	Realer Gesamtstundenaufwand für die Arbeitsvorgänge k	[h]
m_{LE}	Menge der herzustellenden Leistungseinheiten	[LE]
$q_{N,Grup}$	Reale Gruppenleistung	[LE/h]
k	Arbeitsvorgänge: k = S: Schalen k = A: Bewehrungseinbau k = Bet: Betonarbeiten	[-]
n	Leistungsmitglieder der Gruppe	[-]
LE	Leistungseinheit, z.B. m^2 ; m^3 ; Stück	

Beispiele für Gruppengrößen:

- n = 4 – 5 Aufstellen der Grossflächenschalungen wie Wandelemente oder Deckentische
- n = 4 – 6 Verlegen von Bewehrung für Decken und Wände
- n = 4 Betonieren von Wänden und Decken, Betonierpumpe 1 Person, Verteilen auf Decke/Wand ca. 3 Personen

8 Faktoren

Muldeninhalt Transportfahrzeuge V_{FSAE} [m^3]

Nenninhalt des Grabgefäßes V_{SAE} [m^3]

Schüttdichte ρ_s [t/m^3]

Lösefaktor α [fm^3/m^3]

Füllfaktor φ [-]

Bedienungsfaktor η_1 [-]

Betriebsfaktor η_2 [-]

Abbau-/Grabtiefenfaktor f_1 [-]

Schwenkwinkeleinfluss-/Fahrwegfaktor f_2 [-]

Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3 [-]

Schneiden-/Zahnzustandsfaktor f_4 [-]

Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor f_5 [-]

Geräteausnutzungsgrad η_G [-]

Kurvenwiderstandsbeiwert w_k [‰]

Rollwiderstandsbeiwert $w_{r(W)}$ [‰]

Faktoren

Überblick

Die nachfolgend aufgeführten Faktoren können analog für die Leistungsberechnung bei unterschiedlichen Gerätegruppen verwendet werden. Faktoren, die nur speziell für ein bestimmtes Gerät benötigt werden, sind bei der Leistungsberechnung vom jeweiligen Maschinenhersteller (z.B. [6], [7]) zu erfragen.

		[Einheit]
V_{FSAE}	Muldeninhalt des Fahrzeugs gemäss SAE	$[\text{m}^3]$
V_{SAE}	Nenninhalt des Grabgefässes gemäss SAE	$[\text{m}^3]$
ρ_s	Schüttdichte	$[\text{t}/\text{m}^3]$
α	Lösefaktor	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
φ	Füllfaktor	$[-]$
η_1	Bedienungsfaktor	$[-]$
η_2	Betriebsfaktor	$[-]$
f_1	Abbau-/Grabtiefenfaktor	$[-]$
f_2	Schwenkwinkleinfluss-/Fahrwegfaktor	$[-]$
f_3	Entleerungsgenauigkeitsfaktor	$[-]$
f_4	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	$[-]$
f_5	Verfügbarkeits-/Gerätezustandsfaktor	$[-]$
η_G	Geräteausnutzungsgrad	$[-]$
w_K	Kurvenwiderstandsbeiwert	$[\%]$
w_R	Rollwiderstandsbeiwert	$[\%]$

Muldeninhalt des Fahrzeugs [m³]

V_{FSAE}

LKW, SKW, Dumper

Bezüglich des Muldeninhalts eines Fahrzeugs V_{FSAE} sind nach SAE-Norm die gestrichene und die gehäufte Füllung zu unterscheiden. Transportfahrzeuge dürfen im öffentlichen Strassenverkehr mit Schüttgütern nicht über den gestrichenen Muldeninhalt $V_{FSAE,1}$ hinaus beladen werden. Dies gilt auch für das Überqueren einer öffentlichen Strasse mit Baufahrzeugen. Lose, trockene und staubige Bodenmaterialien müssen für den Transport angefeuchtet bzw. abgedeckt werden, um eine Aufwirbelung während der Fahrt zu vermeiden.

Fahrzeug im Strassenverkehr:

Muldeninhalt = $V_{FSAE,1}$ = gestrichene SAE-Füllung = Wassermass

Für SKW und Dumper, die nur im Baustellenverkehr eingesetzt werden, kann neben der gestrichenen Füllung nach SAE auch der gehäufte Muldeninhalt $V_{FSAE,2}$ angenommen werden [69]. Die gehäufte Füllung hat eine Böschungsneigung nach SAE-Norm von 1:2.

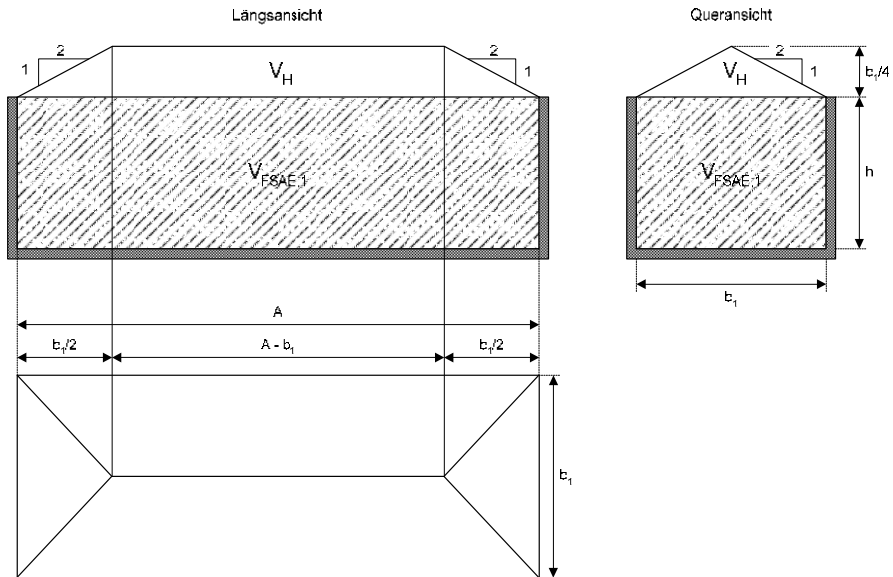
Fahrzeug im Baustellenverkehr:

Muldeninhalt = $V_{FSAE,2}$ = gehäufte SAE-Füllung (1:2)

Der Muldeninhalt gemäss SAE-Norm ist in den Prospekten der Fahrzeughersteller angegeben bzw. kann nach Bild 8-1 berechnet werden.

Muldeninhalt des Fahrzeugs [m³]

V_{FSAE}



Gestrichene Füllung: $V_{FSAE,1} = b_1 \times A \times h$ [m³]

Gehäufte Füllung: $V_{FSAE,2} = V_{FSAE,1} + V_H$ [m³]

Berechnung von V_H : $V_H = (A \times b_1^2) / 8 - (b_1^3 / 24)$ [m³]

Bild 8-1: Muldeninhalt eines Fahrzeugs gemäss SAE-Norm [69]

Nenninhalt Grab- gefäß [m³]

V_{SAE}

Der Nenninhalt V_{SAE} des Hochlöffels, des Tieflöffels und der Ladeschaufel ist definiert als deren gehäufte Füllung mit einer allseitigen Böschungsneigung nach SAE-Norm. Er wird vom Gerätehersteller angegeben oder kann mit Hilfe der nachfolgenden Gleichungen für Tieflöffel sowie Hochlöffel und Ladeschaufel errechnet werden [69], [70].

Dimensionierung von Baggerlöffeln

Die Grösse von Grab- und Ladewerkzeugen und somit auch das maximale Fassungsvermögen V_{SAE} können mit nachstehender Überschlagsformel überschlägig aus der Motorleistung P (kW) des Baggers berechnet werden [8]:

$$V_{SAE} \leq 0.015 \times P \quad [m^3]$$

In diese Formel geht die Lagerungsfestigkeit des Materials nicht ein. Die Formel ist nur anwendbar für locker gelagertes Material wie z.B. Sand. Fester gelagertes bzw. schwieriger zu lösendes Material wie z.B. fester Ton erfordert höhere Motorleistungen. Für eine entsprechende Lade- und Reissleistung muss das Gerät auch ein ausreichendes Gewicht aufweisen, um die Reaktionskräfte aufzunehmen.

Nenninhalt Grab- gefäss [m³]

V_{SAE}

Tieflöffel

Der Nenninhalt (Kubikmeter Volumen) des Tieflöffels wird nach SAE-Norm berechnet, da die europäischen CECE-Richtlinien veraltet sind und keine Gültigkeit mehr haben [69], [70], [71].

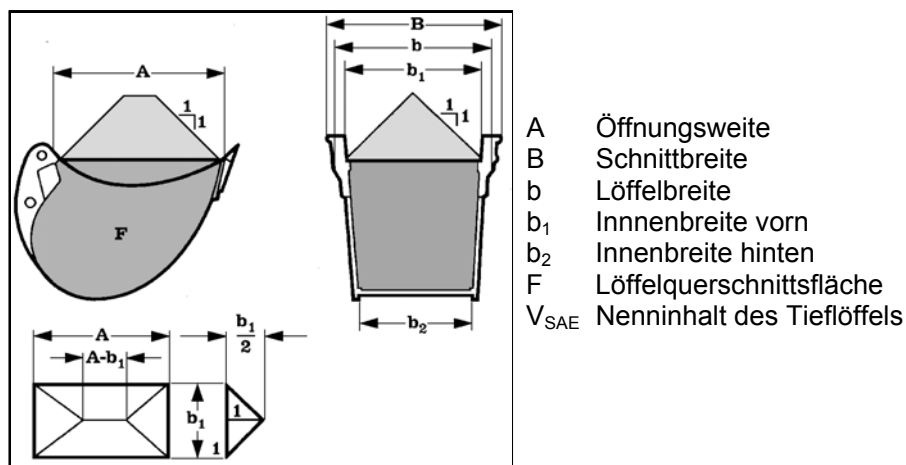


Bild 8-2: Geometrie eines Tieflöffels gemäss SAE-Norm [6]

$$V_{SAE} = F \times \frac{b_1 + b_2}{2} + \frac{A \times b_1^2}{4} - \frac{b_1^3}{12} \quad [m^3]$$

Nenninhalt Grab- gefäß [m³]

V_{SAE}

Hochlöffel und Ladeschaufel

Für die Berechnung des Nenninhalts (Kubikmeter Volumen) von Hochlöffel und Ladeschaufel ist die Neigung der Häufung bei den beiden Normen SAE und CECE identisch [69], [70], [71]:

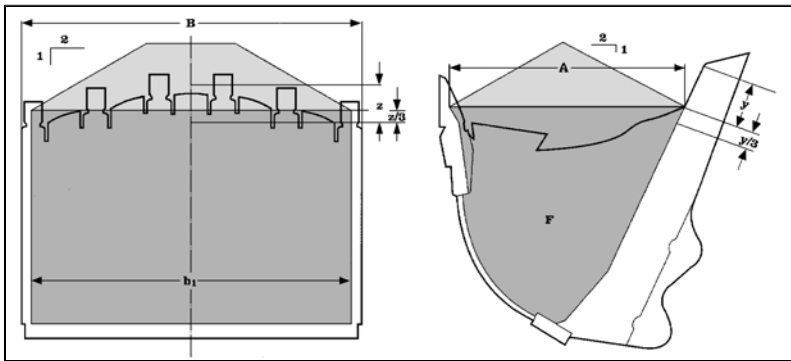


Bild 8-3: Geometrie einer Ladeschaufel [6]

- A Öffnungsweite
- B Schnittbreite
- b₁ Innenbreite
- F Löffelquerschnittsfläche
- y Höhe des Überlaufblechs
- z Vorsprung der Schneidelippe
- V_{SAE} Nenninhalt der Ladeschaufel

$$V_{SAE} = F \times b_1 + \frac{A \times b_1^2}{8} - \frac{b_1^3}{24} \quad [m^3]$$

Schüttdichte [t/m^3]

ρ_s

Die Schüttdichte ρ_s dient zur Berechnung des Transportvolumens bzw. Transportgewichts von Transportfahrzeugen. Sie gibt die Dichte von losem z.B. auf eine LKW-Mulde geschüttetem bzw. gelöstem Material an.

Die Schüttdichte ρ_s für verschiedene Bodenarten und Schüttgüter kann Tabelle 8-1 entnommen werden. Jedoch ist dabei zu beachten, dass Schwankungen auftreten infolge

- des Feuchtigkeits- bzw. Wassergehalts des Bodens,
- des Grads des Lösens aus der natürlichen Lagerung (z.B. bei bindigen Böden), abhängig von der Grösse des Grabgefässes,
- der Körnungslinie des Bodens, insbesondere bei bindigen Böden.

Schüttdichte [t/lm³]

ρ_s

Tabelle 8-1: Schüttdichte ρ_s und Lösefaktor α für diverse Bodenarten nach [7]

Boden- und Fels- klasse nach DIN 18300	Boden	Rohdichte $\rho_{s, \text{eff}}$ Mittelwert [t/lm ³]	Schüttdichte ρ_s Mittelwert [t/lm ³]	Schüttdichte ρ_s^* Bandbreite [t/lm ³]	Lösefaktor α Mittelwert [t/lm ³]	Lösefaktor α Bandbreite
1 Oberboden	Mutterboden	1.37	0.95		0.69	
2 Fließende Böden	—	—	—	—	—	—
3 Leicht lösbare Böden	Erde	1.90 2.02	1.51 1.60		0.75 0.80	
	Sand	1.60 1.90 2.08	1.42 1.69 1.84		0.89 0.89 0.88	
	Sand und Kies	1.93 2.23	1.72 2.02		0.89 0.91	
	Kies	2.17 1.89 1.90 2.26	1.93 1.51 1.69 2.02		0.89 0.89 0.89 0.89	
	Erde	1.54	1.25		0.81	
	Ton	2.02 1.84 2.08	1.66 1.48 1.66		0.82 0.80 0.80	
4 Mittelschwer bis sehr 5 schwer lösbare Böden	Ton und Kies	1.66 1.84	1.42 1.54		0.86 0.84	
	Sand und Ton	2.02 2.40	1.60 2.02		0.79 0.84	
	Zerfallenes Gestein	1.96	1.57		0.80	
	Zerfallenes Gestein	2.28 2.79	1.72 1.96		0.75 0.70	
6 Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten	Schiefer	1.66	1.25		0.75	
7 Schwer lösbarer Fels	Sandstein	2.52	1.51		0.60	
	Granit	2.73	1.66		0.61	
	Basalt	2.97	1.96		0.66	

* Ändert sich entsprechend dem Feuchtigkeitsgehalt, der Korngröße, dem Verdichtungsgrad usw. Die Materialeigenschaften lassen sich nur durch Tests genau bestimmen.

Lösefaktor [fm^3/lm^3]

α

Da das natürliche Gefüge des anstehenden Bodens beim mechanischen Lösen, Brechen, Sprengen, Bewegen und Laden aufgerissen und aus seiner gewachsenen Lagerung gelockert wird, wächst das Material volumemässig an. Die tatsächliche Füllung von Hoch- und Tieflöffel, Lade- und Klappschaufel besteht daher aus mehr oder weniger losem Material. Da die Nutzleistung Q_N eines Erdbaugeräts jedoch immer in Relation zum fertigen Bauprodukt (Leistungsposition), z.B. zum Aufmass der ausgehobenen Baugruben oder Gräben bzw. des aufgeschütteten Damms, betrachtet wird, muss sie in Festkubikmeter pro Zeitstunde [fm^3/h] angegeben werden. Den Zusammenhang zwischen den Volumen von gewachsenen und gelockerten Böden beschreibt der Lösefaktor α . Er berechnet sich als Quotient aus der Schüttdichte ρ_s des gelockerten oder losen Bodens nach dem mechanischen Lösen und der Rohdichte ρ_{fest} des gewachsenen Bodens in natürlicher Lagerung. In der Literatur wird der Lösefaktor auch als Auflockerung oder als Auflockerungsfaktor bezeichnet.

$$\alpha = \frac{\rho_s}{\rho_{\text{fest}}}$$

[fm^3/lm^3]

Die Auflockerung von dicht bzw. kompakt gelagerten Böden ist grösser als die von locker gelagerten Böden. Aus diesem Grund besitzen kompakte Böden wie z.B. Fels nach dem Sprengen im Gegensatz zu den weniger dicht gelagerten kleinere Lösefaktoren. Die Bandbreite des Lösefaktors beläuft sich dabei von $\alpha = 1.0$ für bereits lose vorkommende Schüttgüter wie z.B. Splitt bis hinunter zu $\alpha = 0.6$ für aus seiner natürlichen Lagerung gesprengten Fels. Alle nicht wasserlöslichen, vollständig trockenen Schüttgüter, die zum Grossteil aus einer Korngrösse bestehen, lassen sich nicht wesentlich auflockern oder verdichten.

Der Lösefaktor eines bestimmten Bodens stellt allerdings keine konstante Grösse dar, sondern verändert sich je nach Feuchtigkeitsgehalt, Ausgangsverdichtung und Bedienungsqualifikation des Baggerfahrers, welche grossen Einfluss auf die Intensität der Gefügestörung beim Bodenabtrag besitzt. Der Einsatz grosser Grabgefässe und ein zügiges, gleichmässiges Abtragen führen zu einer niedrigeren Auflockerung und damit zu einem höheren Lösefaktor als die Verwendung kleinerer Grabgefässe oder der ruckartige Ansatz des Tieflöffels. Daher werden in Tabelle 8-1 die Werte auch in einer Bandbreite angegeben.

Lösefaktor [fm^3/lm^3]

α

Wird der abgetragene Boden auf der Baustelle an anderer Stelle wieder eingebaut, so muss bei unterschiedlichen Lagerungsdichten für Abtrags- und Einbaustelle (z.B. bei der Aufschüttung mit grob gesprengtem Fels) in der Kalkulation bzw. der Arbeitsvorbereitung Folgendes beachtet werden:

Soll das Mengenaufmass auf dem Bodeneinbau basieren, dann ist für die Leistungsberechnung neben dem Lösefaktor auch der geforderte Verdichtungsfaktor an der Einbaustelle massgebend.

Anhaltswerte für Verdichtungs Faktoren δ_v können Tabelle 3-7 entnommen werden. Lösefaktoren α für verschiedene Bodenarten/-klassen nach [7] befinden sich in Tabelle 8-1. Bei der Nutzleistungsermittlung für wiederverwendete Böden im Einbau gilt:

Abbau z.B. durch Hydraulikbagger:

$$Q_{N,\text{fest}} = \frac{V_{\text{SAE}}}{t_s} \times 3600 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \eta_G \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

Transport:

$$Q_{N,\text{lose}} = Q_{N,\text{fest}} \times \frac{1}{\alpha} \quad [\text{lm}^3/\text{h}]$$

Einbau:

$$Q'_{N,\text{fest}} = Q_{N,\text{lose}} \times \delta_v = Q_{N,\text{fest}} \times \frac{\delta_v}{\alpha} \quad [\text{fm}^3/\text{h}]$$

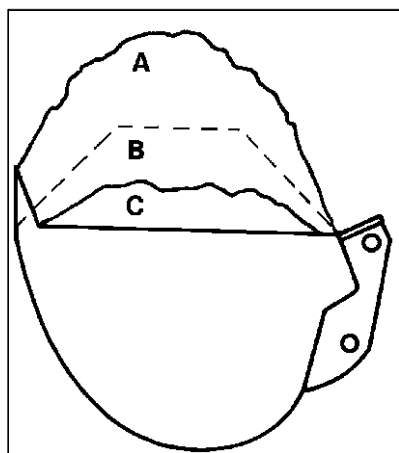
Beim Einsatz von Verdichtungsgeräten für den Bodeneinbau kann in vielen Fällen ein höherer Verdichtungsgrad gegenüber dem gewachsenen Zustand erzielt werden, d.h. $\frac{\delta_v}{\alpha} < 1$ [6].

Füllfaktor [-]

φ

Je nach Bodenstruktur und Feuchtigkeitsgehalt variiert aufgrund des sich ändernden inneren Reibungswinkels und/oder der Kohäsion der Neigungswinkel der über die Löffeloberkante hinausgehenden Aufhäufung und damit der effektive Inhalt des Grabgefäßes. Da dieses Phänomen von der SAE-Norm abweicht, muss bei der Leistungsberechnung als Korrekturbeiwert der Füllfaktor φ berücksichtigt werden. Der Füllfaktor φ ist definiert als Quotient aus dem effektiven Inhalt und dem Nenninhalt des Grabgefäßes gemäss SAE-Norm:

$$\varphi = \frac{\text{effektiver Inhalt}}{\text{Nenninhalt nach SAE - Norm}} \quad [-]$$



- A** Füllfaktor $\varphi = 1.2$, effektiver Inhalt, z.B. bei feuchtem Ton
- B** Füllfaktor $\varphi = 1.0$, Grabgefäß gefüllt nach SAE-Norm
- C** Füllfaktor $\varphi = 0.75$, effektiver Inhalt, z.B. bei gesprengtem Fels

Bild 8-4: Füllfaktor für den Tiefelöffel [7]

Bei bindigen Böden, z.B. feuchtem Ton, kann der Füllfaktor φ deutlich über 1.0 betragen, wohingegen der effektive Inhalt des Grabgefäßes bei geschichtetem oder gesprengtem Fels den SAE-Norminhalt deutlich unterschreitet (Bild 8-4).

Neben der Bodencharakteristik beeinflussen auch die Eigenschaften des Grabgeräts und des Grabgefäßes den Füllfaktor φ . Ein hohes Eindringvermögen, eine hohe wirksame Ausbrechkraft sowie neue Grabzähne und Löffelschneiden führen zu einer besseren effektiven Füllung und damit zu einem höheren Füllfaktor φ . Bei neuen und daher langen Zähnen liegt das effektive Fassungsvermögen des Grabgefäßes am

Füllfaktor [-]

ϕ

stärksten über dessen Fassungsvermögen nach SAE-Norm. Mit zunehmendem Zahn- und Schneidenschleiss sinkt das effektive Fassungsvermögen ab [8]. Diese technischen Einflussfaktoren werden gesondert durch die Faktoren f_i berücksichtigt.

Die in den Tabellen angegebenen Füllfaktoren werden nur erreicht, wenn das Grabgefäss vor der Füllung leer gewesen ist. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass sich das Grab- und Ladegefäss bei jedem Arbeitsspiel auch vollständig entleert. In bindigen Böden oder in Sandböden mit stark bindigen Anteilen sowie bei der Arbeit mit schmalen Grabgefässen (z.B. Drainagelöffeln) ist die vollständige Entleerung nicht immer gewährleistet, da Bodenreste an den Grabgefässwänden haften bleiben und so das SAE-Nominalvolumen stetig verringern. Entleerungshilfen oder die regelmässige Reinigung des Grabgefässes durch Anschlagen des Löffels schaffen hier Abhilfe [8], allerdings verringert sich dann die Geräteausnutzung.

Tabelle 8-2: Werte für den Füllfaktor ϕ bei Tieflöffeln nach [6]

Tieflöffel				
	Boden- und Fels- klasse nach DIN 18300	Boden	Füllfaktor ϕ [-] Mittelwert	Füllfaktor ϕ [-] Bandbreite
				0.6 1.0 1.2
1	Oberboden	Mutterboden	1.20	
2	Fliessende Böden	—	—	
3	Leicht lösbare Böden	Sand, Kies-Sand-Gemisch, erdfeucht Nassbaggerung Sand, Kies	1.05 0.80	
4	Mittelschwer lösbare Böden	Bindige Böden, Lehm, Ton sandiger Lehm, erdfeucht	1.05	
5	Schwer lösbare Böden	Harter Ton	0.90	
6	Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten	Fels, gut gesprengt Fels, grob gesprengt	0.90 0.80	
7	Schwer lösbarer Fels	Fels, schichtig gelagert, Direktabbau	0.75	

Füllfaktor [-]

ϕ

Tabelle 8-3: Werte für den Füllfaktor ϕ bei Hochlöffeln und Klappschaufeln nach [6]

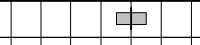
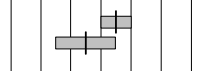
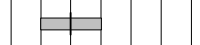
Hochlöffel / Klappschaufel				
	Boden- und Fels- klasse nach DIN 18300	Boden	Füllfaktor ϕ [-] Mittelwert	Füllfaktor ϕ [-] Bandbreite
1	Oberboden	Mutterboden	1.05	
2	Fliessende Böden	——	——	
3	Leicht lösbare Böden	Lehmiger Sand, lehmiger Kiessand, erdfeucht	1.05	
4	Mittelschwer lösbare Böden	Bindige Böden, Lehm, Ton sandiger Lehm, erdfeucht	1.05	
5	Schwer lösbare Böden	Harter Ton	1.00	
6	Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten	Fels, gut gesprengt Fels, grob gesprengt	0.95 0.85	
7	Schwer lösbarer Fels	Fels, schichtig gelagert, Direktabbau	0.80	

Tabelle 8-4: Füllfaktor ϕ [-] für LKW im Strassenverkehr mit $V_{FSAE,1}$ und LKW, Dumper und SKW im Baustellenverkehr mit $V_{FSAE,2}$

	Böden	Muldeninhalt	Füllfaktor ϕ
Strassenverkehr LKW	Bindige Böden	$V_{FSAE,1}$	1.00 – 1.10
	Rollige Böden		0.90 – 1.00
Baustellenverkehr LKW, Dumper, SKW	Bindige Böden	$V_{FSAE,2}$	1.00 – 1.10

Bei der Ermittlung des SAE-Füllinhalts der Grab- und Ladegefäße sowie bei den angegebenen Füllfaktoren φ wurde davon ausgegangen, dass die Arbeiten von bedienungstechnisch ausreichend qualifizierten Maschinenführern durchgeführt werden. Weicht die Qualifikation des Maschinenführers von der eines geübten Fahrers ab, so ist dies bei der Leistungsberechnung mit dem Bedienungsfaktor η_1 zu berücksichtigen. Ungeübte Anfänger können die Nutzleistung gegenüber geübten Fahrern wesentlich unterschreiten. Die Skala der Qualifikationsunterschiede mit den Auswirkungen auf die Nutzleistung kann folgender Tabelle entnommen werden:

Tabelle 8-5: Bedienungsfaktoren η_1 [8]

Bedienungsfaktor	η_1
Vorführer	1.10
geübter Fahrer (sehr gut)	1.00
durchschnittlicher Fahrer	0.80
ungeübter Anfänger	0.65

Die Beurteilung eines Maschinenführers hinsichtlich seiner Qualifikation und bedienungstechnischen Erfahrung ist schwierig. Der Beurteilende sollte selbst über eine ausreichende Erfahrung und gute bedienungstechnische Kenntnisse und Fertigkeiten verfügen. Neben den Gerätebewegungen können so zusätzlich die Steuermanipulationen des Maschinenführers in die Bewertung einfließen bzw. korrigiert und erlernt werden.

Werden Defizite bei Maschinenführern im Umgang mit Baumaschinen festgestellt, so sollten folgende alternative bzw. additive Massnahmen ergriffen werden:

- Externe Schulungen durch Maschinenhersteller, besonders bei neuen Geräten. Sie stellen sicher, dass die Geräte richtig benutzt und instandgehalten werden.
- Intern wechselnder Einsatz auf verschiedenen Erdbaustellen unter Anleitung eines erfahrenen Maschinenführers. Erst dadurch kann der Maschinenführer die Praxis und Routine erlangen, das Gerät unter den wechselnden Randbedingungen verschiedenster Baustellen optimal zu bedienen und die Leistung des Geräts voll auszuschöpfen.

Neben den bedienungstechnischen Qualifikationen des Geräteführers hat die Motivation in Abhängigkeit von Betriebsklima, Leistungsanerken-

Bedienungsfaktor [-]

η_1

nung, Prämien etc. einen ganz entscheidenden Einfluss auf seine Leistung. Diese eher arbeitspsychologischen Einflüsse werden in dem Bedienungsfaktor mitberücksichtigt, wie bereits im Kapitel 1.1 „Leistungsbegriffe“ erläutert wurde.

Betriebsfaktor [-]

η_2

Im Betriebsfaktor η_2 werden die Bedingungen für den Einsatz der Geräte auf der Baustelle berücksichtigt.

Die Betriebsbedingungen werden beeinflusst durch:

- Optimale Abstimmung der Geräte in der Prozesskette
- Wetter und Sichtverhältnisse
- Zustand der Bewegungsoberfläche für die Lade- und Transportgeräte
- Platzverhältnisse für die optimalen Bewegungsabläufe der Geräte

Sehr gute Betriebsbedingungen zeichnen sich wie folgt aus:

gute Arbeitsvorbereitung
gute Abstimmung der Geräte aufeinander
keine besonderen örtlichen Erschwernisse
keine Abhängigkeit vom Wetter
gute Instandhaltung der Geräte durch den Bauhof

Tabelle 8-6: Betriebsfaktor η_2

Betriebsbedingungen	η_2
sehr gut	1.00
gut	0.95
mittel	0.85
schlecht	0.70 – 0.80

Der Betriebsfaktor beinhaltet auch Unterbrechungen, die infolge von Organisationsmängeln oder bei der Zusammenarbeit mehrerer Maschinen entstehen können, z.B. durch ungenügende Abstimmung von Baugeräten in einer Prozesskette. Die Betriebsbedingungen werden durch örtliche Erschwernisse, wie z.B.

- schlechte Sichtverhältnisse
- Hindernisse in der Arbeitsumgebung, z.B. Grabenverbau,

beeinträchtigt. Zusätzlich kann das Wetter starken Einfluss auf die Betriebsbedingungen haben:

- Im Erdbau ist der Einfluss des Wetters auf den Wassergehalt und die Konsistenz des Bodens für die Durchführung der Arbeiten von besonderer Bedeutung. Der Wassergehalt und die Konsistenz der Böden werden z.B. durch Regen verändert. Dies betrifft vor allem bindige und

tonige Böden. Pneu-Transportfahrzeuge können nicht befestigte Baustrassen so stark aufweichen und destabilisieren, dass sich schlechte Betriebsbedingungen einstellen. Bei stark bindigen und tonigen Böden sollte das Planum bei Einsetzen von Regen nicht mehr befahren werden, da sonst die natürliche Tragstruktur des Bodens zerstört wird. Das fertige Planum solcher Böden sollte immer mit Quergefälle versehen und abgewalzt/verdichtet werden. Dadurch kann Regen auf dem schnellstmöglichen Weg abgeleitet werden, ohne das Planum aufzuweichen.

- Die Konsistenz des Bodens kann sich auch durch Frosteinwirkung verändern. Weiche bindige Böden erhalten eine temporäre Stabilisierung bzw. Verfestigung und sind dadurch ohne Zusatzmassnahmen befahrbar. Jedoch verschlechtert sich im Abbau die Lösbarkeit des Bodens für Grabgeräte, da der Boden durch die natürliche Froststabilisierung eine Verfestigung erfahren hat. Vorsicht ist beim Auftauen dieser Böden hinsichtlich der Befahrbarkeit und Destabilisierung geboten, da die Böden erst auf der Oberfläche auftauen und damit Wasser freisetzen, das nicht in den immer noch gefrorenen Boden abfließen kann.

Abbau-/Grabtiefenfaktor [-]

f_1

Für jedes Grabgefässvolumen existiert eine optimale Grabtiefe bzw. Abbauhöhe. Unter- oder überschreitet die vorhandene Abgrabungstiefe oder -höhe diesen optimalen Wert, so ist dies in der Leistungsberechnung durch den Abbau-/Grabtiefenfaktor f_1 leistungsmindernd zu berücksichtigen [5]. Die optimale Wand- und Grabtiefe hängt im Wesentlichen von der Sitz-/Sichtposition des Maschinenführers und der Grösse und Kinematik des Geräts, die durch den Löffelinhalt charakterisiert sind, ab.

Tabelle 8-7: Optimale Wandhöhen [72]

		Löffelinhalt [m³]						
		0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
Optimale Wandhöhe bei:								
Rolligem Material	[m]	1.9	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.5
Schüttfähigem Material	[m]	2.4	2.6	3.2	3.5	3.8	4.2	4.9
Stark bindigem Material	[m]	2.8	3.0	3.8	4.1	4.5	5.0	6.2

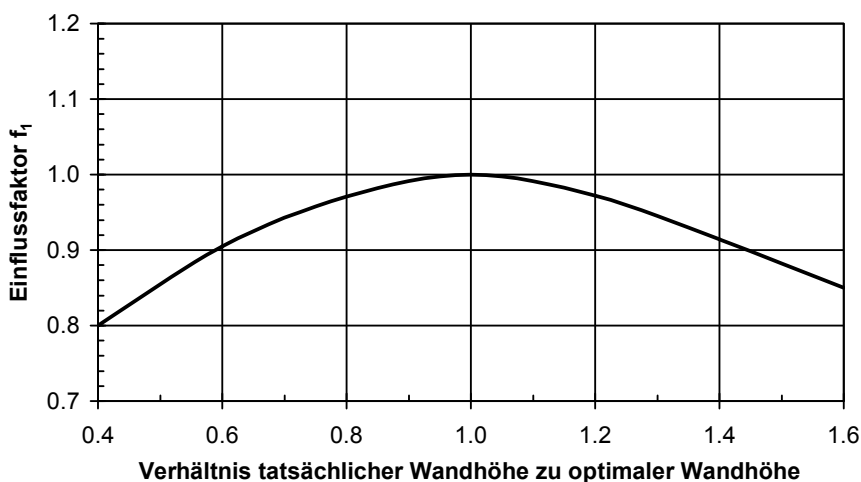


Bild 8-5: Verhältnis tatsächlicher Wandhöhe zu optimaler Wandhöhe [72]

Abbau-/Grabtiefenfaktor [-]

f_1

Der optimale Abbau-/Grabtiefenfaktor f_1 verlangt ein weitgehend behinderungsfreies Arbeiten. Dann kann der Baggerfahrer bereits während des Rückschwenkens des Oberwagens ohne zusätzlichen Zeitaufwand den Baggerausleger auf das Niveau der Grabtiefe absenken. Befinden sich dagegen in unmittelbarer Nähe höhere Hindernisse, die zwingend zu überschwenken sind, so muss zumindest ein Teil des damit verbundenen vertikalen Zusatzwegs zur effektiven Grabtiefe addiert werden.

Auch die Komplexität und die Platzverhältnisse innerhalb des Grabenverbaus sowie die Wirkungen unterschiedlicher Sichtverhältnisse haben Einfluss auf die Nutzleistung [8]. Die Abweichungen von den optimalen Betriebsbedingungen finden Berücksichtigung im Betriebsfaktor η_2 .

Schwenkwinkeleinfluss-/ Fahrwegfaktor [-]

f_2

Der Schwenkwinkeleinfluss-/Fahrwegfaktor f_2 berücksichtigt die Abweichung vom 90°-Schwenkwinkel vom Füllen bis zum Entleeren des Grab- und Ladegefäßes bzw. die Abweichung des tatsächlichen Rangierwegs vom optimalen Rangierweg beim Einsatz von Rad- und Kettenladern. Er charakterisiert die optimale Position im Grundriss zwischen Lade- und Transportgerät.

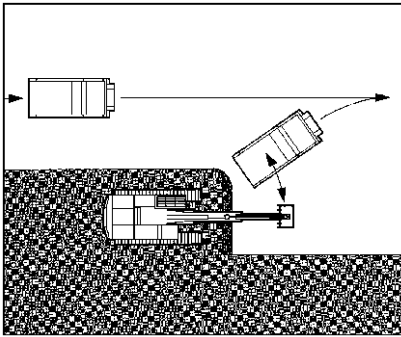


Bild 8-6: Optimale Schwenkbewegung beim Beladen des LKW [6]

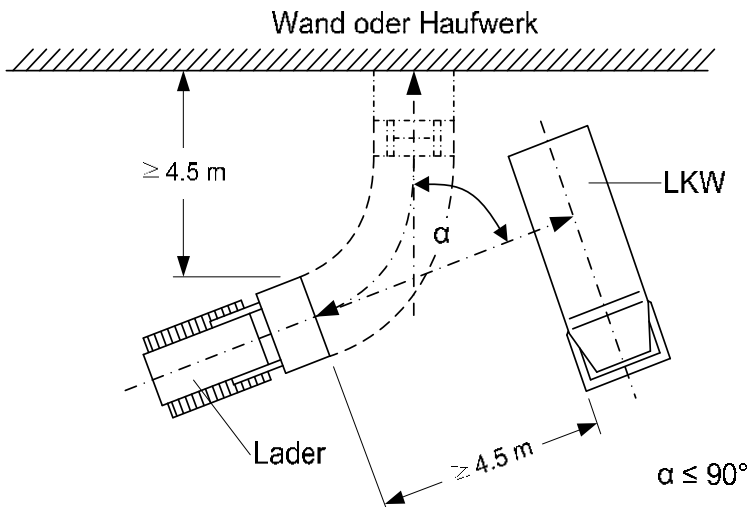


Bild 8-7: Optimaler Rad-/Raupenlader – LKW-Betrieb [5]

Schwenkwinkeleinfluss-/ Fahrwegfaktor [-]

f_2

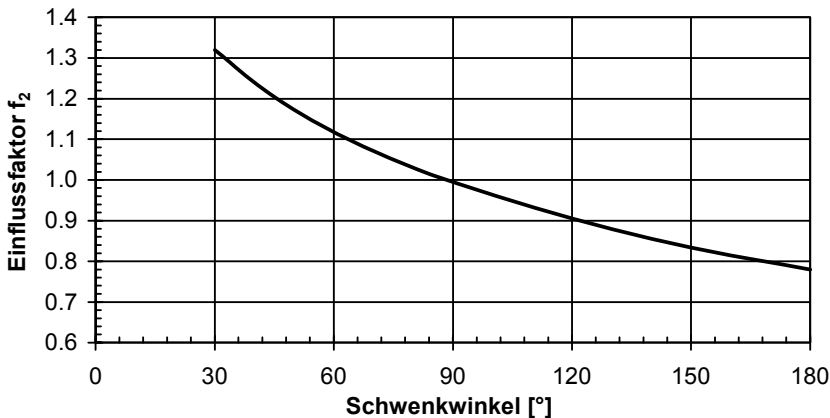


Bild 8-8: Einflussfaktor f_2 des Schwenkwinkels bzw. Fahrwegs [72]

Um eine grosse Nutzleistung zu erreichen, sollten Bagger stets mit einem möglichst kleinen Schwenkwinkel und Rad- und Kettenlader mit einem möglichst kleinen Rangierweg arbeiten. Optimal sind Schwenkwinkel zwischen 0° und 45° , die aber nicht auf jeder Baustelle realisierbar sind, bzw. Fahrwegwinkel $\leq 90^\circ$. Vorzugsweise sollte die Schwenkbewegung bei Baggern nach links erfolgen, da die Position der Fahrerkabine auf der linken Seite des Oberwagens es dem Baggerfahrer erlaubt, den gesamten Schwenkbereich im Voraus zu überblicken. Auf der rechten Seite des Oberwagens befinden sich der Ausleger sowie die Aufbauten, daher ist die Sicht über diese Seite stark eingeschränkt. Der Baggerfahrer kann deshalb nach rechts nur mit erhöhter Vorsicht und wesentlich langsamer schwenken. In der Arbeitsvorbereitung muss bei Erdarbeiten mit Bagger-LKW-Einsatz die Links-Schwenkseite berücksichtigt werden, um die optimale Leistung zu erzielen. Dies gilt auch für LKW-, SKW- und Dumperfahrer, denen die optimale Schwenkseite des Baggers bekannt sein muss, um die richtige Beladungsposition einnehmen zu können.

Bereits in der Arbeitsvorbereitung sind Baustrassen und Bauabläufe sowie die damit einhergehenden Maschinenpositionen festgelegt, welche die optimale Schwenkrichtung sowie den Schwenkwinkel bzw. Fahrweg und Fahrwinkel bestimmen und damit die erzielbare Nutzleistung maxi-

Schwenkwinkeleinfluss-/ Fahrwegfaktor [-]

f₂

mieren. Nachträgliche Änderungen an der Bauablaufplanung und der Baustelleneinrichtung sind in der Bauausführungsphase nur mit grossem Aufwand zu bewerkstelligen, da die hohe technologische Vernetzung der Prozesse untereinander häufig eine komplette und aufwendige Überarbeitung der Ablaufplanung erforderlich macht [8].

Entleerungsgenauigkeitsfaktor [-]

f_3

Der Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3 berücksichtigt die Leistungsminde- rung, die durch das gezielte Entleeren des Grabgefässes z.B. in eine LKW-Mulde gegenüber dem ungezielten Entleeren auf eine räumlich nicht begrenzte Halde entsteht. Das ungezielte Entleeren wird als Be- zugsgrösse mit dem Faktor $f_3 = 1.0$ angesetzt.

Untersuchungen und Messungen in der Baustellenpraxis haben gezeigt, dass der Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3 für das zielgenaue Entleeren vom Volumenverhältnis von Transportgefäss und Grabgefäss abhängt.

Da das Lösen, Ausheben, Verladen und Transportieren von Bodenmate- rial normalerweise durch eine Produktionskette aus Ladegerät und Transportfahrzeugen erfolgt, kommt der Faktor f_3 fast immer zur Anwen- dung. Je kleiner der Quotient aus geometrischem bzw. effektivem Fas- sungsvermögen von Fahrzeugmulde und Grabgefäss ist, desto exakter muss der Baggerfahrer arbeiten, um die ausgehobenen Bodenmassen auf der Mulde des Transportfahrzeugs ohne Verluste und lastausgeglichen zu verteilen. Die lastausgeglichene Beladung erfordert dann unter Umständen ein sehr sorgfältiges Verteilen des Materials über die gesam- te Muldenfläche durch wiederholte Teilentleerungen.

Besondere Sorgfalt ist bei der Auswahl und Abstimmung der richtigen Grösse des Transportfahrzeugs auf das Ladegerät geboten. Wird das Volumen des Transportgefässes im Vergleich zum Grab- bzw. Ladege- fässvolumen zu klein gewählt, führt dies zu häufigen Fahrzeugwechseln, die wiederum zu Stillstandzeiten beim Ladegerät als Leitgerät der Pro- duktionskette führen können.

Für die Ermittlung des Entleerungsgenauigkeitsfaktors f_3 ist zunächst die Bestimmung des folgenden Volumenverhältnisses erforderlich:

$$\text{Volumenverhältnis} = \frac{\text{Volumen des Transportgeräts}}{\text{Volumen der Löffelgrösse}} = \frac{V_{\text{FSAE}}}{V_{\text{SAE}}}$$

Entleerungsgenauigkeitsfaktor [-]

f_3

Mit Hilfe von Bild 8-9 lässt sich nun der Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3 in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis ablesen:

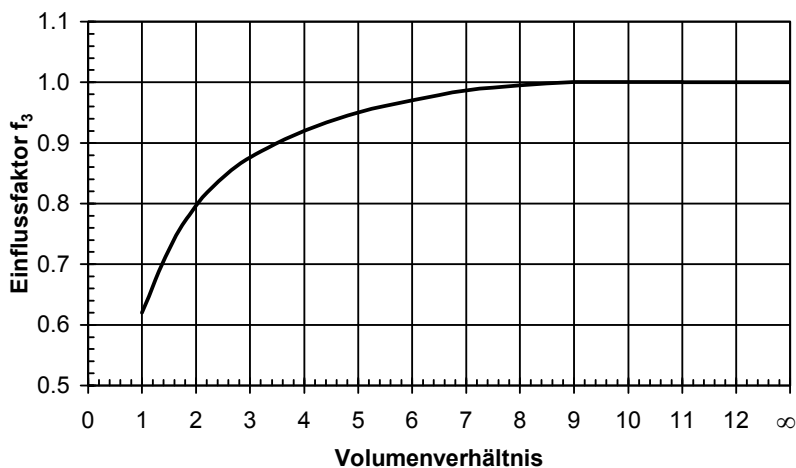


Bild 8-9: Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3 [72]

Schneiden-/ Zahnzustandsfaktor [-]

f₄

Der Zustand der Löffelschneiden bzw. der Grabzähne beeinflusst die Leistungsfähigkeit von Löse- und Ladegeräten. Abgenutzte Bagger- bzw. Laderzähne können die Leistung eines Ladegeräts je nach Bodenart um bis zu 20 % senken. Im Allgemeinen können folgende Werte angenommen werden:

Tabelle 8-8: Schneiden-/Zahnzustandsfaktor f_4 [-] nach [8]

Schneiden-/Zahnzustandsfaktor	f_4 [-]
Neuzustand	1.00
mittlerer Verschleiss	0.90
hoher Verschleiss	0.80

Verfügbarkeits-/ Gerätezustandsfaktor [-]

f_5

Die Verfügbarkeit von Baumaschinen ist abhängig von der präventiven Wartung und Instandhaltung der Maschine. Mit wachsender Anzahl der Betriebsstunden und zunehmendem Alter von Baugeräten steigen die Instandsetzungserfordernisse. In den Wartungszeiten infolge Verschleisses oder den Reparaturzeiten aufgrund von Maschinendefekten stehen die Baumaschinen für den Baustelleneinsatz nicht zur Verfügung. Bei neuen Baumaschinen bzw. sehr kurzen Einsatzzeiten spielt der Instandhaltungszustand nur eine untergeordnete Rolle. Bei diesen Einsätzen kann die Leistungsberechnung ohne Minderung durch plötzliche Maschinenausfälle mit dem Faktor $f_5 = 1.0$ vorgenommen werden. Bei allen anderen Leistungsberechnungen, vor allem bei Langzeiteinsätzen, kann entweder auf eigene Erfahrungswerte, z.B. aus der Maschinenkartei des eigenen Unternehmens, in der für jede Maschine jeweils Ursache und Umfang der Ausfallszeiten festgehalten sind, oder auf die Werte aus Tabelle 8-9 für den Gerätezustandsfaktor f_5 in Abhängigkeit von den bisher geleisteten Betriebsstunden zurückgegriffen werden:

Tabelle 8-9: Gerätezustandsfaktor f_5 [-] [8]

Gerätezustandsfaktor		f_5 [-]
	– 1000 Betriebsstunden	1.00
1000	– 1500 Betriebsstunden	0.93
1500	– 2000 Betriebsstunden	0.85
2000	– 3500 Betriebsstunden	0.75
3500	– 5000 Betriebsstunden	0.65

Muss innerhalb einer Produktionskette eine bekanntermassen technisch sehr anfällige bzw. alte Maschine als Leitgerät eingesetzt werden und entsteht damit im Falle eines Ausfalls eine Gefährdung des planmässigen Baufortschritts, so sollte zur Kompensation immer eine „Springermaschine“ als Ersatz zur Verfügung stehen oder bekannt sein, wo schnellstens ein Ersatzgerät gemietet werden kann. Besser ist in jeder Hinsicht der Einsatz von sorgfältig gewarteten und technisch zuverlässigen Baumaschinen. Aber auch hier sollte vor Arbeitsbeginn festgelegt sein, woher bei einem Maschinenausfall schnellstmöglich ein Ersatzgerät bezogen und die Reparatur durchgeführt werden kann [8]. Um ein Maximum der Maschinenausnutzung während der planmässigen Betriebsstunden zu gewähren, soll eine festgelegte Wartungs- und Reparaturzeit ausserhalb der Einsatzzeit unbedingt vorgesehen sein.

Geräteausnutzungsgrad [-]

η_G

Der Geräteausnutzungsgrad wird durch technische Bedingungen sowie durch die physische und psychische Gesamtbelastung und die Belastungsfähigkeit des Geräteführers bestimmt. Daher kann man im Allgemeinen davon ausgehen, dass die Geräte nicht 60 Minuten pro Stunde im Einsatz sind. Beim Bagger ist es z.B. aufgrund technischer Bedingungen erforderlich, das Gerät nach Erreichen des maximalen/optimalen kinematischen Bewegungsbereichs seines Arms bzw. Arbeitsbereichs umzusetzen. Je komplizierter die Bedienvorgänge bzw. die Umweltbedingungen sind, umso konzentrierter muss der Geräteführer arbeiten. Arbeiten bei engen Grabenverhältnissen und naher Bebauung bzw. Verkehrswegen erfordern höhere Konzentration und vorsichtigere Bewegungsabläufe als das Ausheben einer Baugrube im offenen Gelände. Diese technischen Bedingungen sowie die hauptsächlich psychische Belastung des Maschinenführers reduzieren die rechnerische Leistung durch z.B. Nebenarbeiten oder Kurzpausen. Auch das Umsetzen der Geräte im Arbeitsbereich während des Arbeitsfortschritts findet durch diesen Faktor (z.B. beim Grabenaushub) Berücksichtigung.

Folgende Reduktionsfaktoren werden bei Lade- und Aushubgeräten angesetzt:

Tabelle 8-10: Geräteausnutzungsgrad η_G [-] [5]

Geräteausnutzungsgrad	η_G [-]
offene Baugrube und Entleeren auf Fahrzeug	0.75 – 0.80
Grabenaushub und Entleeren auf Fahrzeug	0.60 – 0.75
Aushub im öffentlichen Verkehrsraum	0.50 – 0.65

Unter günstigen Bedingungen kann man mit einem Geräteausnutzungsgrad von 50 Minuten pro Stunde rechnen.

Kurven- widerstandsbeiwert [‰]

w_k

Kurven-/Krümmungswiderstandsbeiwert [‰] für den einzelnen schienen-
gebundenen Wagen [73] (massgebend hierfür ist die stärkste Krümmung
der Förderstrecke!):

600 mm Schmalspur:

$$w_k = \frac{370 \times a - 167 \times a^2 + 75}{K} - 1.7 \quad [\text{‰}]$$

900 mm Schmalspur:

$$w_k = \frac{260 \times a - 30 \times a^2 + 112.5}{K} - 1.4 \quad [\text{‰}]$$

w _k	Kurven-/Krümmungswiderstandsbeiwert	[‰]
a	Achsstand	[m]
K	Krümmungsradius	[m]

Tabelle 8-11: Richtwerte für w_k [‰] [14]:

Kurvenwiderstandsbeiwert	w _k [‰]
Normalspur	1 – 6
Schmalspur	3 – 10

Rollwiderstandsbeiwert [‰]

$w_{r(W)}$

Rollwiderstand der inneren Lager bei Schmalspurwagen [73]:

Formeln nach Engel für den einzelnen Wagen bei $v \cong 12 \text{ km/h}$

bei Gleitlager:

$$w_{r(W)} = \frac{16.3}{V_{\text{FSAE}} + 0.31} + 3.1 + 0.056 \times v^2 \quad [\text{‰}]$$

bei Wälzlager:

$$w_{r(W)} = \frac{5.5}{V_{\text{FSAE}} - 0.1} + 1.85 + 0.058 \times v^2 \quad [\text{‰}]$$

V_{FSAE} Muldeninhalt $[\text{m}^3]$
 v Geschwindigkeit $[\text{km/h}]$

Für den einzelnen Wagen beim Gleisbetrieb:

Tabelle 8-12: Rollwiderstandsbeiwerte der Räder für einzelne Wagen beim Gleisbetrieb [14]

Rollwiderstandsbeiwert		$w_{r(W)} [\text{‰}]$
Schmalspur	600 mm	8 – 10
Schmalspur	900 mm	6 – 8
Normalspur	1435 mm	5 – 6

Rollwiderstandsbeiwert [‰]

$w_{r(W)}$

Schwerkraftlastwagen:

Tabelle 8-13: Rollwiderstandsbeiwerte w_r [‰] für Schwerkraftlastwagen [72]

	w_r [‰]
Beton, Asphalt	15
Erdstrassen	
glatt, hart, trocken (Kies mit Lehm)	20
trocken, nicht verdichtet, lockeres Material	30
weicher, zerfurchter Boden, schlecht instandzusetzen	40
feuchte, schlammige Oberfläche auf festem Grund	40
weicher, zerfurchter Boden	60
unverdichtete Kippe	80
trockener Sand oder Kies	100
tief zerfurchter, schlammiger Untergrund	160
Schnee	
verdichtet	300
10 cm locker	500

9 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis



- [1] Girmscheid, G.: Bauhof- und Bauinventarmanagement als Schlüssel zur Ergebnis- und Liquiditätssteigerung. Hrsg.: Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1999.
- [2] Girmscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2000.
- [3] Schubert, E.: Baumaschinen, Bauverfahren, Baustelleneinrichtung. Vorlesungsskript, Textbuch II, Technische Universität Darmstadt, 1992.
- [4] N.N.: BGL-Baugeräteliste 1991. Bauverlag, Wiesbaden, 1991.
- [5] Bauer, H.: Baubetrieb 1. Springer Verlag, Berlin, 1994.
- [6] Liebherr-International AG: Technisches Handbuch Erdbewegungen. Eigenverlag Liebherr-International AG, Bulle (CH), 2000.
- [7] Caterpillar Inc.: Caterpillar Performance Handbook. Eigenverlag Caterpillar, Peoria Illinois (USA), 1999.
- [8] Kotte, G.: Ermittlung der Nutzförderleistung von Hydraulikbaggern. In: TIS Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Bertelsmann Fachzeitschriften, 9/1997, S. 18-28.
- [9] N.N.: Standard-Analysen SBV 1997 - 99 Untertagebau Band 1 und 2. SBV Schweizerischer Baumeisterverband, Zürich, 1997.
- [10] N.N.: Standard-Analysen SBV 1997 - 99 Hochbau Band 1 bis 5. SBV Schweizerischer Baumeisterverband, Zürich, 1997.
- [11] N.N.: Standard-Analysen SBV 1997 - 99 Tiefbau Band 1 bis 7. SBV Schweizerischer Baumeisterverband, Zürich, 1997.
- [12] N.N.: Standard-Analysen SBV 2000 Hochbau/Tiefbau Kombiband 1 bis 4. SBV Schweizerischer Baumeisterverband, Zürich, 2000.
- [13] Berner, F.: Verlustquellenforschung im Ingenieurbau: Entwicklung eines Diagnoseinstruments unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit von Zeitaufnahmen. Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart, Bd. 24, Bauverlag, Wiesbaden, 1983.
- [14] Kühn, G.: Die Mechanik des Baubetriebs Teil 1 - Transportmechanik. Bauverlag, Wiesbaden, 1974.
- [15] N.N.: Richtlinie 92/57/EU des Rates 24. Juni 1992. Brüssel, 1992.
- [16] N.N.: Gesetze und Verordnungen über Arbeitsstätten und Unterkünfte in der BRD:
 - Gesetz über die Mindestaufwendungen an Unterkünfte für Arbeitnehmer vom 23.07.1973.
 - Ausführungsverordnung zum Gesetz über die Unterkunft bei Bauten vom 01.08.1968.
 - Arbeitsstättenverordnung / Arbeitsstätten-Richtlinien.
 - Richtlinien für die Unterkünfte ausländischer Arbeitnehmer in der Bundesrepublik Deutschland vom 01.04.1971.
- [17] Rosenheinrich, G.: Baustelleneinrichtungsplanung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1981.
- [18] Böttcher, P.; Neuenhagen, H.: Baustelleneinrichtung. Bauverlag, Wiesbaden, 1997.

Literaturverzeichnis



- [19] N.N.: Vorschriften für Elektroinstallationen auf Baustellen der BRD:
 - UVV Elektrische Anlagen und Betriebsmittel (VBG 4) 4.79.
 - ICE 439-4 Bestimmungen für Baustromverteiler für Nennspannungen bis 380V Wechselstrom und für Ströme bis 630A.
 - VDE 0100 Bestimmungen für das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000V.
- [20] Drees, G.; Reiff, K.-O.: Die Baustelleneinrichtung. Werner Verlag, Düsseldorf, 1971.
- [21] Jurecka, W.: Kosten und Leistungen von Baumaschinen. Springer Verlag, Berlin, 1975.
- [22] Ruppelt, E.: Druckluft-Handbuch. Vulkan Verlag, Essen, 1996.
- [23] Garbotz, G.: Baumaschinen und Baubetrieb - Band II. Carl Hauser Verlag, München, 1958.
- [24] Rubarth, W. et.al.: Regeneration of Bentonite Mud in Special Civil Engineering Projects. Hrsg.: Schauenburg Maschinen- und Anlagen-Bau GmbH, Mülheim-Ruhr, o.J.
- [25] Bundesausschuss Leistungslohn Bau, Fachgruppe Erdbau: Handbuch BML, Daten für die Berechnung von Baumaschinenleistungen, Erdbaumaschinen. Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 1983.
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18300 – VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Erdarbeiten. Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [27] N.N.: ATM 4.132.2 – Arbeitstechnische Merkblätter für den Baubetrieb. Hrsg.: Verband für Arbeitsstudien REFA, IfA-Verlag, Stuttgart, 1974.
- [28] Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch – Teil 2. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996.
- [29] Türke, H.: Statik im Erdbau. Ernst Verlag für Architekten und bautechnische Wissenschaften, Berlin, 1984.
- [30] Gehbauer, F.: Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulationen im Erdbau. Diss., Universität Karlsruhe, 1974.
- [31] Garbotz, G.: Die Leistungen von Baumaschinen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1966.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 5901 – Breitflussschienen – Masse, statische Werte und Stahlsorten. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [33] N.N.: Fördergurte – Berechnungen. Hrsg.: Continental Aktiengesellschaft, Hannover, 3. Aufl., 1990.
- [34] Zanke, U.: Zur Berechnung von Strömungs-Widerstandsbeiwerten. In: Wasser und Boden, Bonn, 1/1993, S. 14-16.
- [35] Weast, R.C.: CRC Handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data. CRC Press, Cleveland, 1976.
- [36] Richter, H.: Rohrhydraulik. Springer Verlag, Berlin, 1962.
- [37] Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. Werner Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [38] Press, H.; Schröder, R.: Hydromechanik im Wasserbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1966.
- [39] Press, H.: Stauanlagen und Wasserkraftwerke – III. Teil Wasserkraftwerke. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1967.

Literaturverzeichnis



- [40] Kaufmann, W.: Technische Hydro- und Aerodynamik. Springer Verlag, Berlin, 1963.
- [41] N.N.: Bentonit für Tunnelbau und unterirdische Bauverfahren – Ein Handbuch für die Baupraxis. Hrsg.: IBECO, Mannheim, o.J.
- [42] N.N.: Hydraulische Grundlagen für den Entwurf von Kreiselpumpen-Anlagen. Hrsg.: Halberg Maschinenbau und Giesserei GmbH, Ludwigshafen, o.J.
- [43] Lindner, H.: Physik für Ingenieure. Fachbuchverlag, Leipzig, 2001.
- [44] Sauermann, H.D.: Hydraulische Transporte von groben Feststoffen in Kreis- und Segmentrohren. Diss., Technische Universität Braunschweig, 1982.
- [45] Pürschel, W.: Bauingenieur-Praxis – Heft 92 – Fördern und Verteilen von Wasser. Ernst & Sohn Verlag, Kassel, 1965.
- [46] Thönnissen, J.: Kraft- und Arbeitsmaschinen – Kreiselpumpen. Vorlesungsskript, FH Ulm, 2002.
- [47] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 15262 – Stetigförderer, Schneckenförderer für Schüttgut, Berechnungsgrundsätze. Beuth Verlag, Berlin, 1983.
- [48] Lislerud, A.: Hard Rock Tunnel Boring: Prognosis and Costs Tunneling and Underground Space Technology. Elsevier Science Ltd., Oxford (UK), 3/1988, S. 9-17.
- [49] N.N.: Technische Unterlagen. Hrsg.: Voest Alpine, Zeltweg (A), o.J.
- [50] Thuro, K.: Geologisch – geotechnische Grundlagen der Gebirgslösung in Fels. Lehrstuhl für allgemeine, angewandte und Ingenieur-Geologie, TU München, Expert Verlag, Esslingen, 1999.
- [51] N.N.: Technische Unterlagen. Hrsg.: Atlas Copco, Stockholm (SE), o.J.
- [52] Thuro, K.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Münchner geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, München, 1996.
- [53] N.N.: Verordnung über explosionsgefährliche Sprengstoffe (Sprengstoffverordnung) vom 26. März 1980, 941.411. (CH), 1980.
- [54] N.N.: SUVA Form 1484.d – Richtlinien für die Bemessung und den Betrieb der künstlichen Lüftung bei der Durchführung von Untertagarbeiten. Hrsg.: SUVA Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern (CH), 1987.
- [55] N.N.: TBG-Heft – Die Belüftung von Baustellen unter Tage.
- [56] N.N.: TBG-Heft – Belüftungseinrichtungen im Tunnelbau – Bemessung.
- [57] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: SIA Norm 196 – Baubelüftung von Untertagebauten. Eigenverlag SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 1983.
- [58] Esters, K.; Kalthoff, D.; Stewering, T.: Auffahren von Tunnel- und Hohlraumbauwerken in Lockergestein unter sensibler Bebauung. Taschenbuch für den Tunnelbau 1991, Verlag Glückauf, Essen, 1991.
- [59] Kühn, G.: Der maschinelle Tiefbau. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [60] Gehbauer, F.: Baubetriebstechnik II, Teil B: Tiefbau. Schriftenreihe des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, 1994.
- [61] N.N.: Technische Unterlagen. Hrsg.: Delmag, Esslingen, o.J.
- [62] N.N.: Technische Unterlagen. Hrsg.: Dr.-Ing. Ludwig Müller Söhne GmbH & Co KG, Marburg, 1989.
- [63] Drees, G.; Sommer, H.; Eckert, G.: Zweckmäßiger Einsatz von Turmdrehkränen im Hochbau. In: BMT 12, 1980, S. 822-843.
- [64] Seeling, R.: Die Kranbemessung im Hochbau unter besonderer Berücksichtigung des Warteschlangenansatzes. In: BMT 3, 1981, S. 118-124.



- [65] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 459 – Betonmischer, Begriffe, Leistungsermittlung, Grössen. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [66] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1045 – Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [67] N.N.: Technische Unterlagen. Hrsg.: Fa. Putzmeister, Aichtal, o.J.
- [68] N.N.: Arbeitszeit-Richtwerte-Tabelle Hochbau. Hrsg.: Zentralverband des Deutschen Baugewerbes, Zeitechnik-Verlag, Neu-Isenburg, 2002.
- [69] Society of Automotive Engineers, Inc. – SAE Standards:
 - SAE J 67: Shovel Dipper, Claim Bucket and Dragline Bucket Rating (1984).
 - SAE J 296: Excavator Hoe Bucket Rating (1984).
 - SAE J 742: Capacity Rating – Loader Bucket (1985).
 - SAE J 1265: Capacity Rating – Dozer (1988).
 - SAE J 1363: Capacity Rating – Dumper Body and Trailer Body (1985).
 In: SAE Handbook 1990, Vol. 4: On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery, Customer Service SAE, Warrendale, PA, USA.
- [70] Committee for European Construction Equipment CECE:
Europäische Richtlinien:
 - Teil VI-1, für Hydraulikbagger und ihre Einrichtungen (1973).
 - Teil VI-2, für voll drehende Seilbagger und ihre Einrichtungen (1973).
 - Teil VII, für Dumper (Autoschütter und Muldenkipper) und ihre Anbaugeräte (1969).
 - Teil VIII, für Radlader und ihre Anbaugeräte (1972).
 Fachgemeinschaft Bau- und Baustoffmaschinen im Verband Deutscher Maschinenbauanstalten VDMA e.V., Frankfurt/Main.
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:
 - DIN 5485: Benennungsgrundsätze für physikalische Grössen – Wortzusammensetzungen mit Eigenschafts- und Grundwörtern (1986).
 - DIN ISO 6483: Erdbaumaschinen – Muldenfahrzeuge – Nenninhalt (1988).
 - DIN ISO 6484: Erdbaumaschinen – Elevator-Scraper – Nenninhalt (1986).
 - DIN ISO 6485: Erdbaumaschinen – Scraper – Nenninhalt (1980).
 - DIN ISO 7451: Erdbaumaschinen – Hydraulikbagger - Nenninhalt von Tieflöffeln (1997).
 - DIN ISO 7546: Erdbaumaschinen – Lader und Bagger - Nenninhalt von Ladeschaufeln (1985).
 - DIN ISO 9245: Erdbaumaschinen – Leistung der Maschinen - Begriffe, Formelzeichen und Einheiten (1995).
 - DIN ISO 9246: Erdbaumaschinen – Schlepper auf Raupenketten oder Rädern – Plamierschild – Nenninhalt (1988).
 Beuth Verlag, Berlin.
- [72] Kühn, G.: Der maschinelle Erdbau. Teubner Verlag, Stuttgart, 1984.
- [73] Engel, J.: Der Fahrwiderstand des Rollmaterials im Baubetrieb. Diss., TU Berlin, 1931.
- [74] Schexnayder, C. J.; Ledbetter, W. B.; Peurifoy, R. L.: Construction Planning, Equipment and Methods. McGraw-Hill Companies, New York (USA), 1996.
- [75] Halpin, D. W.; Riggs, L. S.: Planning and Analysis of Construction Operations. J. Wiley & Sons, New York (USA), 1992.
- [76] Drees, G.; Spranz, D.: Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen. Bauverlag, Wiesbaden, 1976.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis



Bild 1-1:	Zeitbegriffe für Baugeräteeinsatz und -bewertung	4
Bild 1-2:	Darstellung der Schutterleistung in Abschlagszyklen	14
Bild 1-3:	Leistungsverlauf.....	15
Bild 2-1:	Schematische Darstellung der Leistung von Motoren.....	30
Bild 2-2:	Schematische Darstellung der Gesamtleistung	31
Bild 2-3:	Elektroinstallationsschema einer Baustelle	40
Bild 2-4:	Druckverlauf eines Druckluftsystems	42
Bild 2-5:	Gleichzeitigkeitsfaktor f_3 [-] für Kompressoren	45
Bild 2-6:	Bemessungsdiagramm für Druckleitungen	47
Bild 2-7:	Darstellung einer Sieblinie j zur Erklärung der verwendeten Begriffe.....	49
Bild 2-8:	Beispiel einer Tunnelröhre in verschiedenen Böden.....	50
Bild 2-9:	Sieblinien der anfallenden Böden mit Bestimmung der Gewichtsprozent	51
Bild 2-10:	Schematische Darstellung einer vierstufigen Separationsanlage	53
Bild 3-1:	Spielzeit t_s eines Hydraulikbaggers Liebherr R 942 Litronic mit Tiefelöffel unter optimalen technischen Bedingungen.....	57
Bild 3-2:	Optimaler Einsatz Bagger – LKW	58
Bild 3-3:	Ideale Tiefelöffeleinsätze	59
Bild 3-4:	Spielzeit t_s [s] von Baggern mit Tiefelöffel in verschiedenen Bodenarten in Anlehnung an die DIN 18300.....	60
Bild 3-5:	Spielzeit t_s [s] von Baggern mit Hochelöffel/Klappschaufel in verschiedenen Bodenarten in Anlehnung an die DIN 18300.....	61
Bild 3-6:	Schubleistung $\tilde{Q}_0$ (w) [lm^3/h] von Planierdrauen	71
Bild 3-7:	Steigungsfaktor $f_3(\beta)$	72
Bild 3-8:	Leistungsdiagramm $\tilde{Q}_0$ (w; v; P; V_{P100}) [lm^3/h] für Schubdrauen im Entfernungsbereich bis 50 m.....	73
Bild 3-9:	Klassifizierung der Reissbarkeit des Gesteins nach seismischer Geschwindigkeit	75
Bild 3-10:	Grundreissleistung Q_0 [fm^3/h] einer Raupe mit 240 kW Leistung.....	76
Bild 3-11:	Fahrstrecke.....	78
Bild 3-12:	Förderleistungsdiagramm für Scraper, Rad- und Drauenplanier- geräte.....	81
Bild 4-1:	Idealfall einer Transportkette – Kreisverkehr	100
Bild 4-2:	Realfall instationärer Zustand mit Warteschlange – Kreis- verkehr	100
Bild 4-3:	Idealfall einer Transportkette – Rückstossverkehr	101
Bild 4-4:	Realfall instationärer Zustand mit Warteschlange – Rück- stossverkehr.....	101
Bild 4-5:	Leistung beim Ladegerät – LKW-System.....	105
Bild 4-6:	Korrekturfaktor f_β – Einfluss des Steigungswinkels auf den Fördergutstrom.....	124
Bild 4-7:	Nomogramm zur Bestimmung des Widerstandsbeiwerts λ_j	131
Bild 4-8:	Kreiskrümmen	132

Abbildungsverzeichnis



Bild 4-9:	Kreisrohr-Kniestück	133
Bild 4-10:	Querschnittsänderung.....	134
Bild 4-11:	Prinzipdrucklinie Fall 1 – Pumpe mit Saugleitung	135
Bild 4-12:	Prinzipdrucklinie Fall 2 – Pumpe mit Zulaufdruck	136
Bild 4-13:	Dichteverlauf der Bentonitsuspension bei verschiedenen Bentonit- Wasser-Konzentrationen	140
Bild 4-14:	Abhängigkeit der Froud'schen Zahl Fr_{krit} vom mittleren Korn- durchmesser d_m und der Feststoff-Förderflüssigkeits-Volumen- konzentration μ_{FS} des zu transportierenden Korngemischs	143
Bild 4-15:	Materialfluss bei Hydroschildvortrieb	144
Bild 4-16:	H-Q-Diagramm für Pumpen- und Rohrkennlinien	146
Bild 4-17:	Schematische Darstellung eines Rechenbeispiels	152
Bild 4-18:	Schematische Darstellung der Drucklinie	153
Bild 4-19:	Fall 1 und 2 – Rohr- und Pumpenkennlinie sowie möglicher Betriebsbereich (Pumpe Warman GG 12148).....	165
Bild 4-20:	Schematische Darstellung eines TVM-Tunnelvortriebs mit Förderschnecke zur Materialabfuhr.....	166
Bild 4-21:	Geometrie einer Förderschnecke	167
Bild 4-22:	Steigungen der Schneckenganghöhe und der Schneckenachse	168
Bild 4-23:	Betrachtung eines Ausschnitts der Förderschnecke bezüglich der wirkenden Kräfte	170
Bild 5-1:	Einfluss des Winkels β [°] zwischen der Tunnelachse und den Kluftflächen auf den Kluftfaktor k_S [-].....	176
Bild 5-2:	Bohrbarkeit DRI [-]	177
Bild 5-3:	Kräfte beim Einsatz einer Tunnelbohrmaschine	178
Bild 5-4:	Diagramm zur Bestimmung der maximalen Penetration i_b	179
Bild 5-5:	Einflussfaktor der Meisselgrösse	180
Bild 5-6:	Maximale Bohrkopfumdrehungen m für die Diskenabrollgeschwindigkeit von $v = 110$ m/min	180
Bild 5-7:	Diagramm zur überschlägigen Ermittlung der mittleren Grundabbauleistung Q_0 von TSM.....	180
Bild 5-8:	Zähigkeitsfaktor k_C [-] – Einfluss des Spannungsverhältnisses σ_d/σ_z	183
Bild 5-9:	Schichtabstandsfaktor k_P [-]	183
Bild 5-10:	Meisselverbrauch.....	184
Bild 5-11:	Optimierung Schrägleistung (Schneidkopfantrieb) und Maschinengewicht.....	185
Bild 5-12:	Faktor k_S [-] – Einfluss der Anisotropie bei geschieferten Gebirgen.....	187
Bild 5-13:	Zeitlicher Ablauf eines parallel verlaufenden Sprengvortriebs- zyklus	191
Bild 5-14:	Parallel verlaufender Vortrieb	191
Bild 5-15:	schematischer Druckverlauf bei der Anordnung mehrerer Luttenabschnitte mit Ventilator zwischen den Abschnitten.....	194
Bild 5-16:	Dimensionierung des Ventilators	197
Bild 5-17:	Berechnungsdiagramm für Lutten der Güteklasse S	198
Bild 5-18:	Berechnungsdiagramm für Lutten der Güteklasse A	199
Bild 5-19:	Berechnungsdiagramm für Lutten der Güteklasse B	200

Abbildungsverzeichnis



Bild 6-1:	Ermittlung des erforderlichen manometrischen Pumpendrucks.....	204
Bild 6-2:	Erstellung einer Säule.....	209
Bild 6-3:	Schematische Darstellung der ideellen/statischen Eindringung des Pfahls	214
Bild 6-4:	Kraft–Zeit–Diagramm für Dieselbären (Explosionsrammen).....	219
Bild 6-5:	Vibrationsramme und wirkende Kräfte	222
Bild 6-6:	Diagramm zur Bestimmung der erforderlichen Fliehkraft $F_{VZ,erf}$	227
Bild 6-7:	Herkömmliche Vibrationsrammen	228
Bild 6-8:	Vibrationsrammen mit variabler Fliehkraft.....	228
Bild 6-9:	Variable Fliehkraft – Prinzip der Unwuchtstellung.....	229
Bild 7-1:	Beispiel für eine Grundspielzeit t_s des Turmdrehkranes 140 EC-H6 von Liebherr	233
Bild 7-2:	Grundförderleistung Q_0 [m^3/h].....	239
Bild 7-3:	Einteilung der Arbeitsgänge und Tätigkeiten von Stahlbetonarbeiten	240
Bild 7-4:	Systematische Untergliederung von Armierungsarten.....	243
Bild 8-1:	Muldeninhalt eines Fahrzeugs gemäss SAE-Norm	250
Bild 8-2:	Geometrie eines Tieflöffels gemäss SAE-Norm.....	252
Bild 8-3:	Geometrie einer Ladeschaufel	253
Bild 8-4:	Füllfaktor für den Tieflöffel	258
Bild 8-5:	Verhältnis tatsächlicher Wandhöhe zu optimaler Wandhöhe.....	265
Bild 8-6:	Optimale Schwenkbewegung beim Beladen des LKW	267
Bild 8-7:	Optimaler Rad-/Raupenlader – LKW-Betrieb	267
Bild 8-8:	Einflussfaktor f_2 des Schwenkwinkels bzw. Fahrwegs	268
Bild 8-9:	Entleerungsgenauigkeitsfaktor f_3	271

11 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis



Tabelle 1-1:	Werte für Bedienungsfaktoren η_1 [-]	5
Tabelle 1-2:	Leistungseinflussfaktoren	7
Tabelle 2-1:	Richtwerte der Sozialeinrichtungen	20
Tabelle 2-2:	Wasserbedarf	24
Tabelle 2-3:	Formeln zur Berechnung des erforderlichen Leitungsquerschnitts A [mm ²]	32
Tabelle 2-4:	Zulässige Dauerbelastung und Zuordnung von Überstrom- Schutzorganen für isolierte Leitungen	34
Tabelle 2-5:	Motorleistung von Baumaschinen	35
Tabelle 2-6:	Anschlusswerte diverser Elektrogeräte	36
Tabelle 2-7:	Anschlusswerte verschiedener Beleuchtungskörper	36
Tabelle 2-8:	Motorleistung diverser Baumaschinen	37
Tabelle 2-9:	Anschlusswerte diverser Elektrogeräte	37
Tabelle 2-10:	Berechnungsbeispiel der eingesetzten Beleuchtungen	38
Tabelle 2-11:	Abweichungsfaktor f_1 [-]	44
Tabelle 2-12:	Verlustfaktor f_2 [-]	44
Tabelle 2-13:	Verlustfaktor f_4 [-] – Undichtigkeiten	45
Tabelle 2-14:	Druckluftbedarf $Q_{m,v}$	45
Tabelle 2-15:	Äquivalente Rohrleitungslängen L_i [m]	46
Tabelle 2-16:	Einteilung möglicher Separationsintervalle	52
Tabelle 3-1:	Änderung der Spielzeit Δt [s] eines Radladers	64
Tabelle 3-2:	Ladezeit t_L [s]	66
Tabelle 3-3:	Änderung der Spielzeit Δt [s] eines Kettenlader	67
Tabelle 3-4:	Faktoren im Erdbau	72
Tabelle 3-5:	Diverse Betriebsbeiwerte	80
Tabelle 3-6:	Leistung eines Caterpillar Graders 140H mit 138 kW Leistung	82
Tabelle 3-7:	Anhaltswerte für den Verdichtungsfaktor δ_v	84
Tabelle 3-8:	Einsatzmöglichkeit von Verdichtungsgeräten	85
Tabelle 3-9:	Eignung von Verdichtungsmitteln in grobkörnigem, nicht bindigem Lockergestein	87
Tabelle 3-10:	Eignung von Verdichtungsmitteln in feinkörnigem, bindigem Lockergestein	88
Tabelle 3-11:	Eignung von Verdichtungsmitteln in gemischtkörnigem, bindigem Lockergestein	89
Tabelle 3-12:	Eignung von Verdichtungsmitteln in nicht bindigem Fels	90
Tabelle 4-1:	Durchschnittsgeschwindigkeiten v_i [km/h] für LKW auf ver- schiedenen Untergründen	95
Tabelle 4-2:	Geschwindigkeitskorrekturfaktor k_G	96
Tabelle 4-3:	Bodenkraftschlussbeiwert μ	110
Tabelle 4-4:	Geschwindigkeitsbeiwert κ_1 [-]	111
Tabelle 4-5:	Rollwiderstandsbeiwert w_r [-]	111
Tabelle 4-6:	Auswahlkriterien der Spurweite	112
Tabelle 4-7:	Daten verschiedener Profile	122
Tabelle 4-8:	Bandsteigungsbereich φ [°]	123

Tabellenverzeichnis

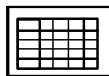


Tabelle 4-9:	Optimale Bandbreite b zur maximalen Korngrösse	124
Tabelle 4-10:	Gurtgeschwindigkeit v	124
Tabelle 4-11:	Theoretischer Füllquerschnitt A_F des Förderbandes	125
Tabelle 4-12:	Kinematische Viskosität ν [m^2/s] von Wasser	130
Tabelle 4-13:	Rauhigkeitswerte k [mm] für Rohre	130
Tabelle 4-14:	Verlustbeiwerte ζ_E [-] für Einlauf aus offenem Becken in ein Rohr	132
Tabelle 4-15:	Verlustbeiwerte ζ_{KK} [-] für Kreiskrümmen	133
Tabelle 4-16:	Verlustbeiwerte ζ_K [-] für Kreisrohr-Kniestücke	133
Tabelle 4-17:	Formbeiwerte für Querschnittsänderungen	134
Tabelle 4-18:	Dampfdruck von Wasser H_D [m]	142
Tabelle 4-19:	Wirkungsgrade	148
Tabelle 4-20:	Zulässige Saughöhen $h_{S,zul}$ bei Aussenatmosphärendruck (H_B) von 10 m Wassersäule	150
Tabelle 4-21:	Fall 1 – Ermittlung der Rohrkennlinie und Leistungen	158
Tabelle 4-22:	Fall 2 – Ermittlung der Rohrkennlinie und Leistungen	162
Tabelle 4-23:	Kritische Fördermengen für verschiedene Flüssigkeits-Feststoff-Gemische	163
Tabelle 4-24:	Matrix der Abhängigkeiten der Abbauleistung (Q_0) bzw. Nettovortriebsleistung (I) von der Fördermenge und der Rohdichte des Feststoff-Flüssigkeits-Gemischs	164
Tabelle 4-25:	Grundwerte des Füllungsgrads φ_0	169
Tabelle 4-26:	Steigungsfaktor f_δ der Schneckenganghöhe	169
Tabelle 4-27:	Staufaktor f_{St}	169
Tabelle 4-28:	Betriebsbedingungen η_2	169
Tabelle 4-29:	Verschiebewiderstandsbeiwert λ in Abhängigkeit von den Materialien	171
Tabelle 5-1:	Faktor k_M [-] zur Berücksichtigung der Wahl des Bohrkopfdurchmessers bei gleicher Hammerleistung	187
Tabelle 5-2:	Faktor k_{BS} [-] zur Berücksichtigung der Art der Bohrstifte	188
Tabelle 5-3:	Praxiswerte für die Penetrationsrate i_b [m/min] in Abhängigkeit von der Gesteinsart und einaxialen Druckfestigkeit	188
Tabelle 5-4:	Trendbeziehung Bohrbarkeit – Bohrgeschwindigkeit – Bohrkronenverbrauch	188
Tabelle 6-1:	Grundbruch-/Pfahlspitzenwiderstand q_s [kN/cm^2] und Mantelreibung τ_M [kN/m^2]	218
Tabelle 6-2:	Widerstandsbeiwert μ_{Dyn} [-] des Bodens	218
Tabelle 6-3:	Stössziffer k [-]	218
Tabelle 6-4:	Eigenfrequenzen ausgesuchter Bodenarten	228
Tabelle 7-1:	Anhaltswerte zur Ermittlung der Grundspielzeit t_s [s]	233
Tabelle 7-2:	Richtwerte zur Abschätzung: Anzahl Arbeitskräfte/Kran	234
Tabelle 7-3:	Richtwerte zur Abschätzung der Kranförderung im Hochbau	234
Tabelle 7-4:	Kranaufwandswerte	234

Tabellenverzeichnis

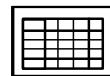


Tabelle 7-5:	Auflockerungsfaktor δ_{Ai} [-].....	236
Tabelle 7-6:	Grenzwerte von Betonpumpen.....	238
Tabelle 8-1:	Schüttdichte ρ_S und Lösefaktor α für diverse Bodenarten	257
Tabelle 8-2:	Werte für den Füllfaktor φ bei Tieflöffeln.....	261
Tabelle 8-3:	Werte für den Füllfaktor φ bei Hochlöffeln und Klappschaufeln	262
Tabelle 8-4:	Füllfaktor φ [-] für LKW im Strassenverkehr mit $V_{FSAE,1}$ und LKW, Dumper und SKW im Baustellenverkehr mit $V_{FSAE,2}$	262
Tabelle 8-5:	Bedienungsfaktoren η_1	263
Tabelle 8-6:	Betriebsfaktoren η_2	265
Tabelle 8-7:	Optimale Wandhöhen	267
Tabelle 8-8:	Schneiden-/Zahnzustandsfaktor f_4 [-]	274
Tabelle 8-9:	Gerätezustandsfaktor f_5 [-].....	275
Tabelle 8-10:	Geräteausnutzungsgrad η_G [-].....	276
Tabelle 8-11:	Richtwerte für w_k [‰]	277
Tabelle 8-12:	Rollwiderstandsbeiwerte $w_{r(W)}$ [‰] der Räder für einzelne Wagen beim Gleisbetrieb.....	278
Tabelle 8-13:	Rollwiderstandsbeiwerte w_r [‰] für Schwerkraftlastwagen.....	279

12 Stichwortverzeichnis

A

Abbauhöhe 6, 56, 57, 58, 265
Abbauvolumen 145, 168
Abnutzungsgrad 6
Absetzgenauigkeit 232
Anisotropie 186, 187
Anker 14, 17, 190, 245
Ankerbohrgerät 190
Anlaufzeit 8
Ansaugleistung 40, 43, 44, 45
Antriebsleistung 105, 126, 127,
..... 171, 172, 182
Anzugskraft 106, 109, 117
Äquivalente
Rohrleitungslängen 46
Arbeitsdruck 44
Arbeitstage 15, 16
Arbeitszeit 3, 8, 12, 16, 17, 22
Aufgabemenge 48
Aufwandswerte 8, 240, 245
Aushub 2, 14, 17, 95, 103, 274

B

Bahnwiderstand 106
Bandförderung 91, 123
Baugerätekosten 3
Bauzeit 2, 9
Bedienungsfaktor 5, 12, 56,
..... 62, 65, 69, 72, 74, 77, 80,
..... 83, 92, 168, 175, 181,
..... 186, 211, 220, 232, 235,
..... 238, 247, 248, 261, 262
Beladezeit 78, 93, 94, 97, 98
Beladungsverhältnis 48, 52
Bentonit 129, 139, 140,
..... 145, 152, 154, 155
Bentonitkonzentration 152
Beschleunigung 107, 117,
..... 221, 223, 224
Betonanlagen 10, 23, 231,
..... 235, 237, 238
Betonarbeiten 247, 248
Betonbau 10, 234
Betonmischer 10, 23, 235
Betonpumpen 10, 237, 238
Betriebsbedingungen 5, 6, 7,
..... 11, 12, 56, 62, 65, 69, 72,
..... 74, 77, 80, 83, 92, 169,
..... 175, 181, 186, 196, 211,

..... 220, 232, 235, 237, 263,
..... 264, 266
Betriebsbeiwert 5, 12, 56,
..... 62, 65, 68, 69, 74, 77, 79,
..... 80, 83, 92, 168, 175, 181,
..... 186, 211, 220, 232, 235,
..... 238
Betriebsfaktor 167, 247,
..... 248, 263, 266
Betriebszeit 3, 4, 6, 7, 8,
..... 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18
Bohrbarkeit 177, 186, 188
Bohren 188, 189, 190
Bohrjumbo 190, 273
Bohrkopfdurchmesser 187
Bohrmaschinen 173, 186
Bohrzeit 189

D

Dampfdruck 142
Deckentisch 242, 248
Dichte 48, 127, 139, 140, 144,
..... 145, 147, 151, 155, 157,
..... 160, 167, 202, 210, 254
Drehmoment 171
Drehzahlregelung 149, 158
Dreiphasenwechselstrom 27, 33
Druckhöhe 128, 138
Druckluftbedarf 40, 42, 45
Druckluftversorgung 19, 41
Druckverlust 194, 202, 205, 206
Dumper 91, 92, 249, 260
Durchflussmenge 136, 207,
..... 208, 209, 210
Dynamische Masse 223

E

Effektivzeit 7
Eigenfrequenz 228
Einarbeitungszeit 15, 17, 18
Eindringtiefe 76, 176, 211, 212, 214,
..... 215
Einphasenwechselstrom 27, 33
Einsatzleistung 13, 15, 16
Einsatzzeit 3, 6, 9, 13,
..... 15, 16, 17, 18, 184,
..... 217, 220, 273
Entleerungsgenauigkeitsfaktor
..... 6, 12, 56, 62, 65, 92,
..... 247, 248, 270, 271

Erdbau 2, 10, 70, 98, 263
 Erdbaugeräte 55

F

Fahrwegfaktor 6, 12, 62,
 65, 247, 248, 267
 Fahrwiderstand 108, 112,
 114, 115, 116, 117
 Fahrzeit 63, 66, 93,
 94, 95, 233
 Fliehkraft 35, 221, 223, 224,
 225, 226, 227, 228, 229
 Flüssigkeitsförderung 91,
 128, 129, 136, 142, 146,
 147, 196, 205, 206, 207
 Förderband 35, 37, 64, 67
 Förderhöhe 135, 137, 140, 147,
 149, 153, 157, 159, 238
 Förderleistung 48, 144,
 148, 150, 155, 156, 159,
 160, 192, 234, 237, 238
 Förderleistungsdiagramm 80, 81
 Fördermittelgrösse 58
 Förderschnecke 166, 167,
 170, 171, 172
 Füllfaktor 12, 56, 62,
 65, 72, 77, 92, 93,
 113, 114, 247, 248,
 258, 259, 260
 Füllung 249, 251, 256, 258, 259
 Füllungsgrad 68, 167, 168, 171

G

Geräteausnutzungsgrad 6,
 7, 12, 13, 43, 56, 62,
 65, 68, 74, 77, 79, 83,
 92, 168, 175, 181, 186,
 211, 220, 232, 235, 236,
 238, 247, 248, 274
 Gerätezustandsfaktor 6,
 12, 56, 62, 65, 67, 74,
 77, 80, 83, 92, 123, 168,
 175, 181, 186, 211, 220,
 232, 235, 238, 247, 248, 273
 Gesamtaushub 16
 Gesamtstundenaufwand 241,
 242, 244, 247, 248
 Gesamtverlusthöhe 126
 Gesamtwasserbedarf 22, 25, 26

Gesamtwiderstand 108
 Geschwindigkeit 75, 76,
 83, 86, 96, 105, 106, 109,
 110, 121, 122, 134, 143,
 159, 202, 205, 206, 276
 Geschwindigkeitshöhe 128,
 138, 141
 Geschwindigkeitskorrekturfaktor 96
 Gleisförderung 91, 112
 Grabentiefe 6, 56, 58, 266
 Grabtiepenfaktor 6, 12, 247,
 248, 265, 266
 Grader 55, 68, 82
 Grossflächenschalung 248
 Grundabbauleistung 139,
 144, 145, 166, 167, 174,
 175, 181, 182
 Grundleistung 4, 6, 11,
 12, 14, 146, 147,
 151, 159, 161
 Grundrammleistung 211,
 214, 215, 216, 219, 220
 Grundspielzeit 63, 232, 233
 Güteklasse 197, 198, 199

H

Hochbau 2, 231, 234
 Hubmasse 232
 Hüllrohr 245
 Hydraulikbagger 55, 56, 57, 257

I

Injektionsgut 203
 Injektionssäulendurchmesser 209

J

Jetgrouting 201, 202

K

Kavitation 142, 149
 Kettenlader 55, 65, 67, 268
 Klufffaktor 174, 176
 Kluffflächen 176
 Kompressor 35, 37, 41, 43, 46
 Kornverteilung 207
 Krane 4, 231, 232
 Kreiselpumpe 141, 142,
 146, 147, 158, 160

kritische Fließgeschwindigkeit	143
Krümmung	141, 275
Kurvenwiderstandsbeiwert	114,
.....	115, 116, 119, 247, 248
Kurzzeitleistungen	11

L

Laderaupen	55, 65
Ladeschaufel	57, 251, 253
Langzeitleistung	13, 103
Lastkraftwagen LKW	2,
.....	10, 58, 64, 67, 69, 91, 92,
.....	94, 95, 96, 249, 254,
.....	260, 267, 268, 270
Leistung	1, 2, 4, 7, 8, 10,
.....	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
.....	21, 27, 28, 29, 30, 32, 52,
.....	70, 76, 82, 98, 158, 161,
.....	186, 188, 192, 217, 220,
.....	232, 240, 261, 262, 268,
.....	272, 274
Leistungsaufnahme	28, 38,
.....	147, 151, 159, 161
Leistungsbegriff	1, 2, 262
Leistungseinflussfaktor	6,
.....	7, 12, 42, 44, 56, 62, 65,
.....	68, 74, 77, 79, 81, 83, 92,
.....	168, 175, 181, 186, 211,
.....	220, 232, 234, 238
Leistungswert	1, 2, 8, 9, 27
Leitfähigkeit	32, 39
Litzen	245
LKW	2, 58, 64, 67, 69, 92,
.....	94, 95, 97, 249, 254,
.....	260, 267, 268, 270
Lösefaktor	12, 56, 62,
.....	65, 69, 70, 74, 77, 79,
.....	80, 92, 105, 113, 165,
.....	166, 175, 247, 248,
.....	255, 255, 256
Lösegerät	16
Lüften	189, 190, 191
Luftmenge	192, 193, 194
Lüftung	192
Lüftungsaggregate	173
Lutte	192, 193, 194

M

Manövrierzeit	66
---------------------	----

Mantelreibung	212, 218
Meißelgrösse	174, 180
Meißelverbrauch	184
Muldeninhalt	92, 93, 94,
.....	98, 100, 247, 248,
.....	249, 250, 260, 276

N

Nenninhalt	12, 23, 56,
.....	62, 65, 79, 94, 100, 113,
.....	114, 235, 247, 248, 251,
.....	252, 253, 258
Nettopenetrationsleistung	174
Nettovortriebsleistung	163,
.....	164, 166, 174
Nutzleistung	4, 12, 13, 14,
.....	17, 56, 62, 65, 68, 69, 74,
.....	83, 92, 99, 105, 123, 232,
.....	256, 261, 266, 268
Nutzrammleistung	211, 220

O

Ortsbrust	145, 166,
.....	181, 189, 190, 191

P

Penetration	174, 177, 179
Permeabilität	207
Pfahlspitzenwiderstand	212, 218
Planiergerät	55, 68, 79, 105
Planierraupe	70, 71,
.....	72, 73, 105
Produktionskette	1, 9, 10,
.....	270, 273
Prozesskette	13, 17, 106, 263
Prozesskettenleistung	106
Pumpe	135, 136, 137, 138,
.....	141, 142, 144, 145, 146,
.....	147, 148, 149, 152, 153,
.....	157, 159, 160, 161, 165,
.....	196, 205, 206, 237, 238
Pumpendruck	206
Pumpenleistung	146, 150, 237

R

Radlader	55, 62
Rammpbarkeit	227
Rammen	201, 211, 220
Rauhigkeitswert	129, 130, 138

Raupenplaniergerät	55, 68,
.....	79, 80, 81
Reduktionsfaktor	4, 12, 274
Reibungsverlusthöhe	129
Reissbarkeit	75, 76
Reynoldszahl	129, 131, 138, 156
Rohrkennlinie	154, 158, 162
Rohrleitung	22, 23, 26,
.....	45, 128, 129,
.....	138, 148, 153
Rollwiderstandsbeiwert	96,
.....	108, 111, 114, 115, 116,
.....	119, 120, 247, 248

S

SAE-Norm	249, 250,
.....	251, 251, 258, 259
Saughöhe	138, 141,
.....	142, 146, 150, 157, 160
Schalungstechnik	242
Schalungsvorbereitung	242
Schieferung	186
Schienen	116, 122
Schildarteinflussfaktor	68, 72
Schlagenergie	212, 213
Schlagramme	212, 213
Schmalspur	112, 275, 276
Schneckenachse	167, 169, 171
Schneckenförderung	91, 165
Schneckenangahöhe	166,
.....	168, 169, 172
Schneckenkraft	170, 171
Schneidkraft	202
Schneidleistung	207
Schubbahnfaktor	72
Schüttdichte	93, 114,
.....	167, 171, 247,
.....	248, 254, 255, 256
Schutterleistung	14
Schütthöhe	83, 86
Schwerlastkraftwagen SKW	91,
.....	92, 93, 95, 97,
.....	249, 260, 268
Scraper	55, 68, 77, 79, 80, 81
Separationsanlage	19, 48,
.....	51, 52, 152
Separationsintervall	48, 49,
.....	50, 51, 52
Sieblinie	48, 49, 50, 51, 52
Sozialeinrichtung	19, 20
Spannung	28, 29, 32, 39

Spannungsabfall	32, 39
Spezialtiefbau	201
Spielzeit	12, 56, 57,
.....	60, 61, 62, 63, 64, 65,
.....	66, 67, 94, 97, 98, 100
Sprengarbeiten	173
Sprengen	13, 188, 191, 192, 256
Sprengloch	190
Spundbohlen	219
Stahlbetonarbeiten	231, 240
Stauungen	167, 168
Steigung	70, 96, 108, 114,
.....	118, 123, 168, 169,
.....	170, 172
Steigungsfaktor	68, 72, 168, 169
Steigungswiderstand	108
Stossziffer	212, 218
Streckenlast	170
Stromversorgung	19, 27
Systemschalung	242

T

Tagesdurchschnittsleistung..	15, 16
Teilschnittmaschine...	173, 181, 182
Theoretische Leistung	232
Tieflöffel	55, 58,
.....	251, 252, 256, 258
Trennschnitt	53
Tunnelbaugerät	173
Tunnelbohrmaschine	151,
.....	173, 174, 178
Tunnelvortrieb	144, 165
Tunnelvortriebsmaschine TVM	48, 165
Turmdrehkran	27, 232

U

Umlaufzeit	68, 69, 77, 78,
.....	92, 93, 97, 102, 103, 221

V

Ventilationsleistung	194
Verdichtungs faktor	83, 84,
.....	235, 236, 257
Verdichtungsgerät	55, 83, 84
Verlust	22, 25, 45,
.....	128, 138, 142, 145, 149,
.....	153, 156, 157, 159, 192,
.....	206, 270

Verlustbeiwert.....	129, 132,
.....	133, 134, 138, 202, 206
Verpressen	245
Vibrationsramme	221, 222,
.....	223, 224, 225, 226, 227
Volumenkonzentration.....	139, 143,
.....	145, 153
Vorhaltezeit.....	3, 4, 15, 17, 18

W

Wandelement	248
Wasserbedarfsermittlung.....	21
Wasserversorgung	19, 21
Widerstand	28
Widerstandsbeiwert	115, 116,
.....	129, 156, 160, 212, 218
Wirkungsgrad	28, 39,
.....	127, 148, 150, 151, 158,
.....	171, 212, 237

Z

Zahnzustandsfaktor	6, 12,
.....	56, 62, 65, 67, 76, 79,
.....	247, 248, 272
Zeiteinheit.....	2, 3
Zugkraft	75, 107, 109, 116, 119