Deutschsprachige Fassung:

Leitfaden **Kontraktorbeton** für Tiefgründungen

der gemeinsamen Arbeitsgruppe "Beton" von EFFC und DFI

EFFC EUROPEAN FEDERATION OF FOUNDATION CONTRACTORS

DFI DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE

Übersetzung
Entwurf V1.1
28. Okt 2018

KIT Karlsruhe Institute of Technology

ZWEITE FASSUNG
2018

Leitfaden über Kontraktorbeton für Tiefgründungen herausgegeben von der gemeinsamen Arbeitsgruppe "Beton“ der EFFC und DFI

2. Ausgabe, 2018

Deutsche Übersetzung erstellt durch Herrn David Alós Shepherd, M.Sc. vom KIT - Karlsruher Institut für Technologie

Anmerkungen zum Leitfaden oder zur deutschen Übersetzung sind erbeten an den Vorsitzenden der Arbeitsgruppe unter: bek@bauer.de

Leitfaden “Kontraktorbeton für Tiefgründungen“

herausgegeben von der gemeinsamen Arbeitsgruppe „Beton“ der EFFC und DFI

2. Ausgabe, 2018

Mitglieder der Arbeitsgruppe:

Karsten Beckhaus *(Vorsitzender)*, Bauer Spezialtiefbau, Auftragnehmer
Bartho Admiraal, Volker Staal en Funderingen, Auftragnehmer
Andrew Bell, Skanska, Auftragnehmer
Björn Böhle, Keller Grundbau, Auftragnehmer
Michel Boutz, SGS-Intron, Planer
Dan Brown, Dan Brown & Associates, Planer
Sabine Darson-Balleur, Soletanche Bachy, Auftragnehmer
Peter Faust, Malcolm Drilling, Auftragnehmer
Raffaella Granata, Trevi, Auftragnehmer
Chris Harnan, Ceecom Consult, Planer
Duncan Moore, Implenia, Auftragnehmer
Duncan Nicholson, ARUP, Planer
Alexander Rostert, Züblin, Auftragnehmer

Korrespondierende Mitglieder:
Francesco Biasioli, European Ready-Mixed Concrete Organization, Generalsekretär
Raymond Fassett, Condon-Johnson and Associates, Auftragnehmer
Stephan Jefferis, Environmental Geotechnics, Planer
Martin Larisch, Fletcher Construction, Auftragnehmer
Antonio Marinucci, V2C Strategists, Planer
Gerardo Marote Ramos, Terratest, Auftragnehmer
Sarah Williamson, Laing O'Rourke, Auftragnehmer

Akademische Partner aus Universitäten:
Jan van Dalen, Technical University of Delft
Dimitri Feys, Missouri University of Science and Technology
Claudia Fierenkothen, Universität Wuppertal
Kamal Khayat, Missouri University of Science and Technology
Thomas Kränkel, Technische Universität München
Chenfeng Li, Swansea University
Dirk Lowke, Technsiche Universität Braunschweig
Nicolas Roussel, French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks
Daniel Weger, Technische Universität München
Christopher Wilkes, Cambridge University

Inhaltsverzeichnis

Begriffe und Definitionen 5

1 Allgemeines 11

1.1 Hintergrund 11

1.2 Ziel und Umfang 11

2 Entwurfskriterien, die das Fließen von Beton beeinflussen 14

2.1 Allgemein 14

2.2 Lichter Abstand der Bewehrung 14

2.3 Betondeckung 15

3 Eigenschaften des Kontraktorbetons 18

3.1 Allgemein 18

3.2 Rheologie und Verarbeitbarkeit 19

3.3 Stabilität des Betons 22

4 Mischungsentwurf des Betons 25

4.1 Einleitung 25

4.2 Überlegungen zum Mischungsentwurf 25

4.3 Ausgangsstoffe 26

4.4 Mischungszusammensetzung und praktische Überlegungen 30

5 Festlegung und Prüfung von Beton und Qualitätskontrolle der Betonproduktion 33

5.1 Ein neuer Ansatz zur Festlegung von Frischbeton 33

5.2 Prüfmethoden zur Charakterisierung des Frischbetons 33

5.3 Eignungs-, Konformitäts- und Annahmeprüfung 34

5.4 Kontrolle der Konsistenzhaltung 36

5.5 Qualitätskontrolle bei der Betonherstellung 37

6 Ausführung 40

6.1 Allgemeines 40

6.2 Vor dem Betonieren 40

6.3 Kontraktorrohr und Trichter 42

6.4 Abstand der Kontraktorrohre 42

6.5 Beginn des Betonierens 42

6.6 Eintauchtiefe des Kontraktorrohrs 44

6.7 Fließmechanismen des Betons 46

6.8 Fließen um Bewehrung und Aussparungen 48

6.9 Betonierprotokolle 49

7 Großmaßstäbliche Versuche 50

8 Qualitätskontrolle des fertiggestellten Bauwerks 51

8.1 Allgemeines 51

8.2 Prüfverfahren nach Fertigstellung 51
9 Numerische Modellierung des Betonflusses 52
9.1 Einleitung 52
9.2 Durchgeführte Studien/Untersuchungen 52
9.3 Anwendungsgrenzen 54
Anhang A – Prüfverfahren zur Charakterisierung von Frischbeton 56
Anhang B – Konzepte für die Anwendung von Zusatzstoffen 71
Anhang C – Verfahren zur Prüfung des fertiggestellten Bauwerks 73
Anhang D – Interpretation von Imperfektionen 75
Anhang E – Detaillierte Hinweise für Entwurf- und Bemesung 80
Anhang F – Zusammenfassung an Faktoren und Auswirkung auf den Betonfluss 91
Literatur 93

Der Inhalt dieses Leitfadens stellt die Ansicht der Autoren dar, die für die Richtigkeit der Daten in diesem Leitfaden verantwortlich sind. Dieser Leitfaden ist keine Norm, Richtlinie oder Verordnung.

Begriffe und Definitionen

BEGRIFF	DEFINITION
Zusatzstoffe	Fein verteilter anorganischer Stoff, der im Beton verwendet wird, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Es wird zwischen zwei Haupttypen unterschieden: Typ I: inerte oder nahezu inerte Zusatzstoffe (Füller) z.B. Kalksteinmehl Typ II: latent hydraulische oder puzzolanische Zusatzstoffe z.B. Flugasche oder Hüttensand
Zusatzmittel	Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben wird, um die Eigenschaften des Frisch-oder Festbetons zu beeinflussen. Zusatzmittel werden häufig als chemische Zusatzmittel bezeichnet.
Schlitzwandelement (Barett)	Ein tragendes in-situ betoniertes (un- oder bewehrtes) Schlitzwandelement, üblicherweise im I, H, L or T Grundriss. Auch als Tiefgründung bezeichnet, siehe Abbildung 1
Bentonit	Stoff, der überwiegend das Mineral Montmorillonit enthält, der in Stützflüssigkeiten entweder als reine Bentonitsuspension oder als Zusatz zu Polymersuspensionen verwendet wird. Wird auch als Komponente in nicht-tragendem Beton verwendet.
Bindemittel (zementartig)	Anorganische Stoffe oder Gemische anorganischer Stoffe, die bei Zugabe von Wasser durch Hydratation erhärten und auch unter Wasser stabil und raumbeständig bleiben.
Bingham-Fluid	Ein zwei Parameter, rheologisches Modell eines Fluides mit einer Fließgrenze ungleich null und einer konstanten plastischen Viskosität
Bluten	Form der Entmischung, bei der Wasser aus dem Beton an der Oberfläche von frisch eingebrachtem Beton austritt.
Bohrpfahl	Pfahl der mit oder ohne Verrohrung hergestellt wird durch Bohren eines Loches im Untergrund und füllen mit Beton (mit oder ohne Bewehrung). Auch als Tiefgründung bezeichnet, siehe Abbildung 1
lichter Abstand	Mindestabstand zwischen einzelnen Bewehrungsstäben oder Bündeln von Bewehrungsstäben, d.h. die Öffnung durch die der Beton durchfließen kann.
Beton	Material welches als Mischung eines Bindemittels, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zusatzstoffe oder –mittel, seinen festen Eigenschaften mit fortlaufender Hydratation entwickelt.
Konsistenz*	Maß für die Verformungsfähigkeit oder Fähigkeit eines Frischbetons zu fließen, d.h. ein Maß für die Verarbeitbarkeit
Betondeckung	Abstand zwischen der äußersten Bewehrung und der am nächsten liegenden Betonoberfläche, d.h. die Außenseite der Tiefgründung
Tiefgründung	Gründungsart mit dem Bauwerkslasten durch gering tragfähige Bodenschichten in tragfähige Bodenschichten abgeleitet werden (Pfähle und Schlitzwandelemente). In diesem Leitfaden werden auch besondere Stützwände wie Schlitzwände und Bohrpfahlwände gezählt.
Schlitzwand	Wand, die aus bewehrtem oder unbewehrtem Beton hergestellt wird, die i.d.R. aus einer Aneinanderreihung einzelner, aneinander anstoßender Elemente besteht. Hier auch als Tiefgründung bezeichnet, siehe Abbildung 1
Dauerhaftigkeit	Eigenschaft eines Materials (z.B. Beton), Witterungseinflüssen, chemischem Angriff, Abrasion und anderen Einwirkungen zu widerstehen.
Feinanteil	Summe aller Feststoffe im Frischbeton mit einer Korngröße kleiner oder gleich 0,125 mm.
Füllfähigkeit	Die Eigenschaft von Frischbeton zu fließen und alle Hohlräume eines Aushubs unter Eigengewicht auszufüllen.
Filterkuchen	Entstehung eines Kuchens aus Filtermaterial, wie Bentonit und Bodenteilchen aus einer Suspension, welches sich in der Übergangszone zu einem durchlässigen Medium durch die Drainage von Wasser unter Druck bildet.
Filtration	Abtrennen von Festoffen und Flüssigkeiten von einer Stützflüssigkeit oder von einem noch nicht vollständig hydratisierten Beton, wobei der umgebende, durchlässige Boden unter hydrostatischem Druck als Filter wirkt, analog der Filtration bei Stützflüssigkeiten.

Fließfähigkeit	Die Fähigkeit von Frischbeton ungestört zu fließen (ohne den Einfluss von Schalung und/oder Bewehrung).
Frischbeton	Beton, der sich nach dem Mischen in einem Zustand befindet, bei dem der Einbau mit dem gewählten Verfahren noch möglich ist. Siehe Kontraktorbeton.
Grenzschicht / Übergangsschicht	Schicht, die sich zwischen Stützflüssigkeit und Beton ansammelt, die womöglich aus entmischtem Beton und/oder Stützflüssigkeit mit Bodenpartikeln gebildet wird
Schlitzwandelement	Abschnitt einer Schlitzwand, der als einzelnes Element betoniert wird. Ein Schlitzwandelement kann gerade sein, eine T- oder L-Form, oder eine andere Form besitzen. Siehe Abbildung 1
Blockierneigung	Fähigkeit des Frischbetons durch enge Öffnungen zu fließen, wie z.B. zwischen Bewehrungsstäben, ohne zu blockieren oder entmischen
Leimgehalt	Teil des Betons, der auch als Bindemittelmatrix bezeichnet wird, bestehend aus Feinanteilen, Wasser, Zusatzmittel und Luft
plastische Viskosität	Viskosität einer Bingham-Flüssigkeit (mit Schubspannung ungleich null)
Rheologie	Wissenschaft über das Verformungs- und, in diesem Leitfaden insbesondere, das Fließverhalten von Stoffen unter Scherbeanspruchung
Robustheit (von Frischbeton)	Fähigkeit der Betonmischung seine Frischbetoneigenschaften nach dem einbringen beizubehalten, trotz geringfügiger zulässiger Abweichungen der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien und deren Dosierung
Sedimentationsstabilität	Fähigkeit des Frischbetons in seiner Zusammensetzung homogen zu bleiben
Sensitivität	Mangelnde Robustheit (siehe Robustheit)
Nutzungsdauer	Angenommene Zeitspanne, während der ein Tragwerk oder ein Teil davon für den geplanten Zweck bei der erwarteten Instandhaltung, aber ohne wesentliche Instandsetzungsmaßnahmen genutzt werden kann (definiert als „Bemessungs-lebensdauer“ in EN 206)
Setzfließmaß	Das Ergebnis des Versuches gemäß EN 12350-8 oder als ASTM C1611
Anforderung (an den Beton)	Finale Zusammenstellung der dokumentierten technischen Anforderungen an den Betonlieferant in Bezug auf Leistung oder Zusammensetzung des Betons
Verfasser der Festlegung	Person oder Organ welches die Anforderungen für den Frisch- und Festbeton festlegen
Stabilität	Widerstand des frischen Betons gegen Sedimentation, Bluten und Filtration.
Fugenabschalelement	Ein Schalungselement, üblicherweise aus Stahl oder Beton, welches am Ende bzw. an den Enden eines Schlitzwandelements angebracht wird, um eine Fuge herzustellen; in der Fuge kann eine Dichtung eingearbeitet werden.
Stützflüssigkeit	Flüssigkeit, die während des Aushubs zur Stützung der Wandungen eines Schlitzes oder Bohrlochs verwendet wird. Siehe auch den EFFC/DFI Leitfaden für Stützflüssigkeiten.
Thixotropie	Die Neigung eines Stoffes zunehmend die Fließfähigkeit zu verlieren, wenn keine mechanische Beanspruchung erfolgt, und die Fließfähigkeit wieder zu erlangen, wenn eine ausreichende Schubspannung aufgebracht wird
Kontraktorbeton	Beton, der sich unter seinem Eigengewicht selbst verdichtet, wenn er (mit einem Kontraktorrohr) im Kontraktorverfahren (unter einer Flüssigkeit) in eine Tiefgründung eingebracht wird
Kontraktorrohr	Aus mehreren Segmenten zusammengesetztes Rohr mit wasserdichten Kupplungen
Kontraktorverfahren	Methode zum Einbau von Beton unter Verwendung eines Kontraktorrohres, um ein Entmischen des Betons oder eine Verunreinigung durch die Flüssigkeit im Aushub zu vermeiden, bei der die untere Öffnung des Kontraktorrohrs – nach dem erstmaligen Einbringen von Beton – bis zum Ende des Betoniervorgangs im zuvor eingebrachten, noch ausreichend verarbeitbaren Beton verbleibt
Viskosität	Maß für die Fähigkeit eines Fluids Scherspannungen zu widerstehen, besonders der Widerstand sobald das Fließen eingesetzt hat
Verarbeitbarkeit*	Die Frischbetoneigenschaft, die den erforderlichen Aufwand für das Mischen, Einbringen, Verdichten und ggf. abschließende Bearbeiten des Betons beschreibt

Konsistenzhaltung	Fähigkeit, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, u.a. gekennzeichnet durch das Setzfließmaß, über einen bestimmten Zeitraum beizubehalten
Fließgrenze	Scherspannung, die erforderlich ist, dass ein Fluid zu fließen beginnt, auch als „statische Fließgrenze“ bekannt

**** Hinweis:** In europäischen und amerikanischen Normen werden die Begriffe „Konsistenz“ und „Verarbeitbarkeit“ nicht einheitlich verwendet.*

In diesem Leitfaden gelten folgende Entsprechungen:

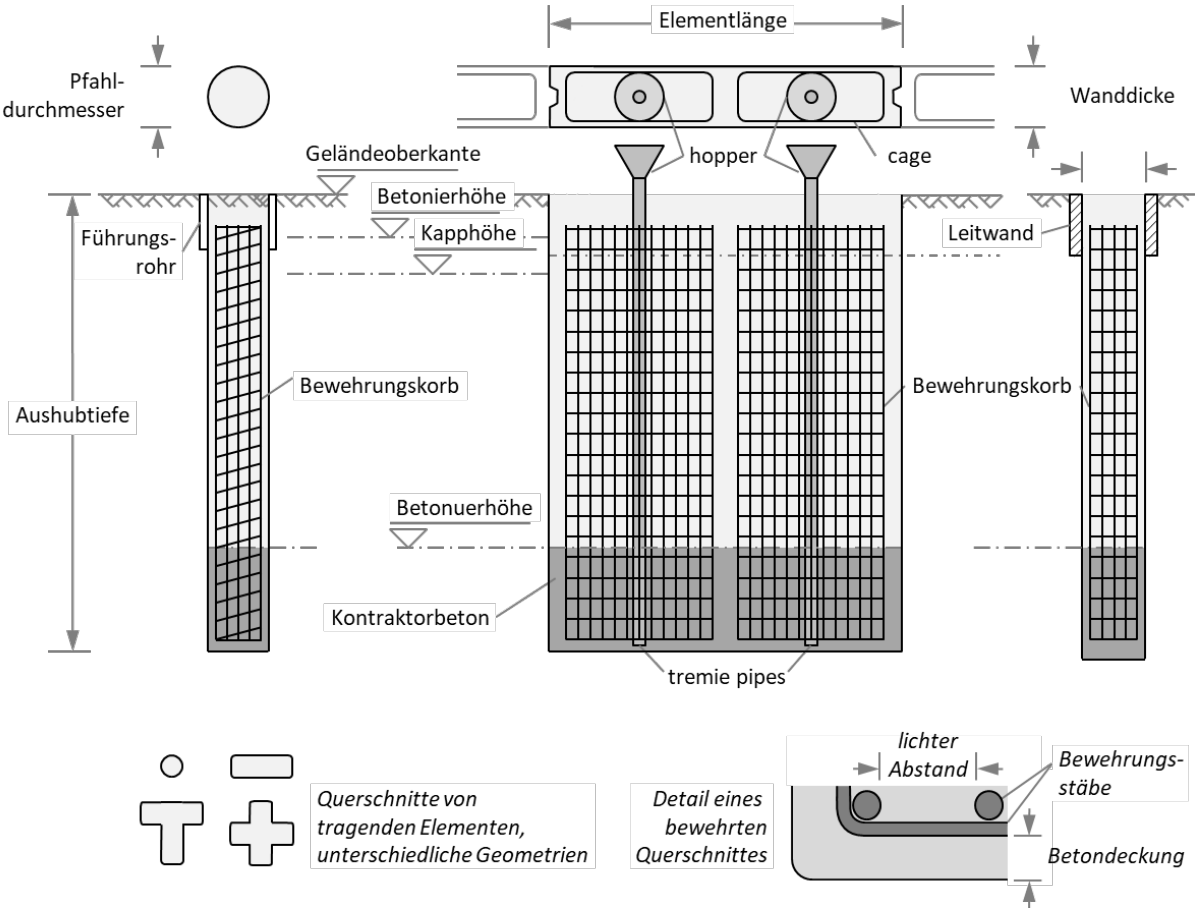
- *Konsistenz: gemessen mit Prüfverfahren wie zum Beispiel dem Setzfließversuch (EN 12350-8)*
- *Verarbeitbarkeit: Sammelbegriff für Frischbetoneigenschaften wie z.B. Fließfähigkeit, Blockierneigung und Füllvermögens inklusive der Konsistenz (siehe Abbildung 4)*

Abkürzungen und Symbole

AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials
ACI	American Concrete Institute
ADSC-IAFD	The International Association of Foundation Drilling
AFNOR	Association Francaise de Normalisation
API	American Petroleum Institute
ASTM	ASTM International
CEN	European Committee for Standardisation
CIA	Concrete Institute of Australia
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association (UK Organisation)
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIN	Deutsches Institut für Normung
DFI	Deep Foundations Institute
ECPC	Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (en: Equivalent Concrete Performance Concept)
EFFC	European Federation of Foundation Contractors
EPCC	Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen (en: Equivalent Performance of Combinations Concept)
FHWA	Federal Highway Administration
GGBS/GGFBS	Hüttensandmehl (en: Ground granulated blast furnace slag)
ICE	Institution of Civil Engineers (UK Berufsverband)
ISO	International Organization for Standardization
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung
QA/QC	Qualitätssicherung/Qualitätskontrolle (en: Quality Assurance/Quality Control)
SCC	Selbstverdichtender Beton (en: Self-Compacting Concrete)
VSI	Visueller Stabilitätsindex (en: Visual Stability Index)
a	minimaler lichter Abstand zwischen Bewehrungsstäben
c_{min}	Mindestbetondeckung gemäß Bemessungs- oder Ausführungsnorm
c_{nom}	Nennbetondeckung = $c_{min} + \Delta c_{dev}$ (in der Planung zu berücksichtigen)
Δc_{dev}	planerisch zulässige Abweichung in der Bauausführung
Δd_c	zusätzliches Toleranzmaß für den Bewehrungskorbeinbau
d_{b-t}	Abstand von der Aushubunterkante zur Öffnung des Kontraktorrohrs
d_{spacer}	horizontale Größe des Abstandshalters (senkrecht zum Bewehrungskorb)
D	Abmessung (Durchmesser o. Dicke) des Bodenaushubs oder des Betonelements
D_c	äußere Größe des Bewehrungskorbes
D_{final}	Enddurchmesser des Setzmaßversuches
D_{max}	Größtkorndurchmesser
D_{nom}	Nennabmessung des Bodenaushubs entsprechend der Abmessung des Aushubwerkzeugs
D_s	Durchmesser eines Bewehrungsstabs
$D_{s,n}$	Ersatzdurchmesser eines Bündels von „n“ Bewehrungsstäben
D_T	innerer Durchmesser des Kontraktorrohres
η	dynamisch Viskosität
h_1, h_2	Eintauchtiefe eines Kontraktorrohr vor (h_1) und nach (h_2) dem Abschlagen eines Segments
h_c	Betonhöhe im Bodenaushub (Bohrung, Schlitz)
$h_{c,T}$	Betonhöhe im Kontraktorrohr (= hydrostatische Ausgleichshöhe)
h_F	Flüssigkeitshöhe im Bodenaushub
k	Faktor zur Berücksichtigung der Aktivität eines Typ-II-Zusatzstoffes
μ	plastische Viskosität
$p_{i,T}$	hydrostatischer Druck innerhalb des Kontraktorrohres
p_o, p_i	hydrostatischer Druck außerhalb (p_o) und innerhalb (p_i) des Bodenaushubs
s_T	Länge des auszubauenden Segments des Kontraktorrohrs

T_{final}	Dauer für das Erreichen des endgültigen Durchmessers im Setzmaßversuch
τ	Scherspannung
τ_0	Fließgrenze
$\dot{\gamma}$	Scherrate

Abbildung 1: Beispiele für Tiefgründungen



1 Allgemeines

1.1 Hintergrund

Die Betontechnologie entwickelt sich rasant weiter und moderne Fünf-Komponenten-Mischungen – Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnung, (chemische) Zusatzmittel und Wasser – weisen häufig Eigenschaften auf, die sich deutlich von den früheren Drei-Komponenten-Mischungen – Zement, Gesteinskörnung und Wasser – unterscheiden. Jüngste Entwicklungen zeigen verstärkt die Verwendung von Betonen mit höheren Festigkeitsklassen und niedrigeren Wasser/Zement-Werten, wodurch eine erhöhte Abhängigkeit von Zusatzmitteln entstanden ist. Diese sollen der geringeren Verarbeitbarkeit entgegenwirken und die (oft widersprüchlichen) Frischbetonanforderungen an die Verarbeitbarkeit und das Erstarrungsverhalten erfüllen. Die Anwendung von Prüfverfahren und Prüfkriterien, welche die tatsächlichen rheologischen Eigenschaften des Betons abbilden, hat sich nicht im gleichen Maße weiterentwickelt wie die Betone selbst. Es ist daher noch immer nicht unüblich, beispielsweise das Ausbreitmaß als alleiniges Annahmekriterium für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons anzuwenden.

Die „European Federation of Foundation Contractors“ (EFFC) und das “Deep Foundations Institute“ (DFI) in den Vereinigten Staaten haben eine gemeinsame Analyse von Problemen bei im Kontraktorverfahren hergestellten Bohrpfählen und Schlitzwänden vorgenommen. Als eine, mehrerer Ursachen wurde die Verwendung von Frischbeton mit unzureichender Verarbeitbarkeit, Stabilität oder Robustheit identifiziert. Weiter wurden die mangelhafte Festlegung des Betons und ungeeignete Prüfverfahren als Ursachen erkannt. Die Konsequenzen dieser Probleme sind häufig schwerwiegend und es wurde erkannt, dass, neben der Auswahl geeigneter Betonausgangsstoffe und geeigneter Betoneinbauverfahren, die Entwicklung geeigneter und robuster Betonmischungen sowie geeigneter Prüfverfahren unabdingbar sind, um die Konformität eines Frischbetons mit der Grundanforderung ausreichender Verarbeitbarkeit und Stabilität – über die Zeit des Einbaus –erreichen zu können.

2014 wurde von EFFC und DFI eine gemeinsame „Arbeitsgruppe Beton“ gegründet, die sich mit den o.g. Themen eingehend befasst und den vorliegenden Leitfaden erstellt hat.

Zwischen 2015 und 2018 wurde an der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Missouri University of Science and Technology ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt bearbeitet, welches durch die Sponsoren dieses Leitfadens finanziert wurde. Dieses Projekt umfasste eine Literaturstudie, Laborversuche sowie Feldversuche auf Baustellen in Europa und den Vereinigten Staaten. Des Weiteren hat die Arbeitsgruppe den Stand der Technik numerischer Methoden zur Simulation des Fließverhaltens von Beton in Tiefgründungen mit Forschungspartnern aus Universitäten gesichtet und bewertet.

1.2 Ziel und Umfang

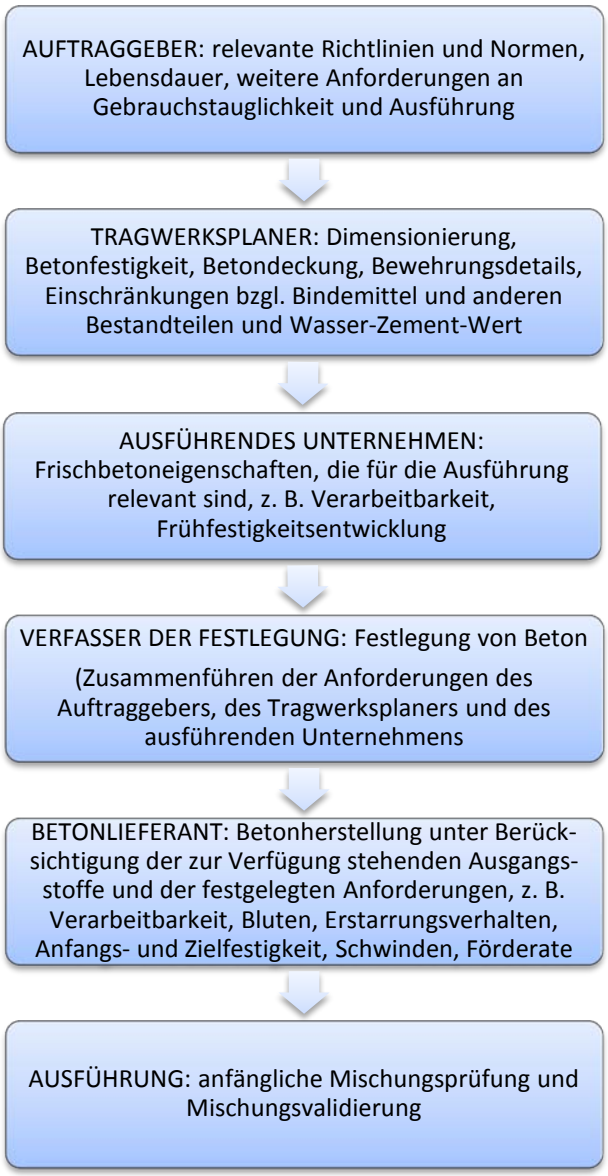
Das vorrangige Ziel dieses Leitfadens ist es, den Frischbeton anhand seines Verhaltens zu charakterisieren sowie orientierend Zusammenhänge beim Mischungsentwurf zu beschreiben und geeignete Prüfverfahren mit geeigneten Kriterien für Frischbetoneigenschaften zu empfehlen. Die Grundsätze dieses Leitfadens gelten für Kontraktorbeton in Tiefgründungen, können aber auch für andere Arten von Tiefgründungen angewendet werden (z.B. Schneckenortbetonpfähle).

Dieser Leitfaden befasst sich im Detail mit der Bewehrungsführung und der Betondeckung, der Betonrheologie, dem Mischungsentwurf und dem Betoneinbau. Außerdem werden Prüfverfahren zur Anwendung an bereits ausgeführten Bauteilen zusammen mit Hinweisen zur Identifizierung und zur Interpretation der Ergebnisse beschrieben.

Abbildung 2 fasst die hohen und häufig widersprüchlichen Anforderungen zusammen, welche bei der Entwicklung einer Betonmischung berücksichtigt werden sollten. Um potentielle Risiken auf ein

Minimum zu reduzieren, behandelt dieser Leitfaden die wichtigsten sorgfältig abzuwägenden Themen, inklusive konstruktiver Bemessungsregeln und entsprechenden Ausführungsmethoden, die dem Stand der Technik entsprechen.

Abbildung 2: Typische Entwicklung vom Betonmischungen



Um einen geeigneten Beton festlegen zu können, müssen der Planer, das Bauunternehmen und der Betonlieferant gemeinsam vorgehen.

Die Arbeitsgruppe hat eine detaillierte Bewertung des Stands der Technik und von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen durchgeführt. Es wird gehofft, dass die Informationen des Leitfadens geeignet sind, dass sie in zukünftige europäische und US-amerikanische Normen einfließen.

Die 2. Auflage des Leitfadens empfiehlt Annahmekriterien für frischen Kontraktorbeton basierend auf den vorgeschlagenen Prüfverfahren. Zudem stellt dieser Leitfaden Details zum Fließverhalten innerhalb des ausgehobenen Elements basierend auf Feldversuchen und numerischen Untersuchungen vor. Diese 2. Auflage ersetzt die 1. Auflage.

Die 1. Auflage dieses Leitfadens beinhaltete Anforderungen an Stützflüssigkeiten. Die Stützflüssigkeit wirkt sich direkt auf die Qualität und Integrität des Endproduktes aus, weshalb Beton und Stützflüssigkeit gemeinsam zu beachten sind. Ein neuer Leitfaden für Stützflüssigkeiten für Tiefgründungen, welcher alle Aspekte der Stützflüssigkeiten abdeckt, wird von einer weiteren Arbeitsgruppe erarbeitet, welche 2017 ebenfalls gemeinsam von EFFC und DFI eingerichtet wurde. Die Veröffentlichung der 1. Fassung ist für 2019 geplant. Die Anforderungen an die Stützflüssigkeiten wurden daher aus der 2. Auflage dieses Leitfadens entfernt.

Dieser Leitfaden richtet sich an alle an der Ausschreibung, beim Entwurf und bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden Beteiligten, einschließlich den Eigentümer/Auftraggeber, Planer, Generalunternehmer und Spezialtiefbauer. Dieser Leitfaden soll eine praxisnahe Ergänzung zu bestehenden Normen darstellen, nicht deren Ersatz. Projektanforderungen, Normen und Richtlinien sollten immer Vorrang haben.

2 Entwurfskriterien, die das Fließen von Beton beeinflussen

2.1 Allgemein

Die Planung von Tiefgründungen ist eine Expertenaufgabe, die vertiefte Kenntnisse sowohl der Tragwerksplanung als auch der Geotechnik erfordern, da auch die Rahmenbedingungen der Ausführung von Tiefgründungen berücksichtigt werden müssen. Dieses Kapitel behandelt ausschließlich konstruktive Details und die Auswirkungen der Bewehrung auf das Fließen des Betons zwischen den Bewehrungsstäben in die Betondeckungszone und das Umschließen der Bewehrungsstäbe. Die Auswirkung des Betoneinbaus auf die Tragfähigkeit auf Spitzendruck und Mantelreibung werden in diesem Leitfaden nicht berücksichtigt. Hierfür sollten der Eurocode 7 (EN 1997-1) oder entsprechende US-amerikanische Standards wie z.B. die FHWA GEC10 berücksichtigt werden.

Mit Bezug auf die konstruktive Ausführung der Bewehrung wäre für das Einbringen von Kontraktorbeton ideal jegliche Behinderung für das Fließen des Betons zu vermeiden. Der Bewehrungskorb, inklusive Abstandshalter und Aussparungen (falls vorhanden), ist jedoch ein wesentliches Hindernis für den Betonfluss. Der konstruktive Entwurf der Tiefgründung inklusive der Ausbildung des Bewehrungskorbes haben daher einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des fertiggestellten Elementes.

Die nachfolgenden Abschnitte geben Empfehlungen für den Bewehrungsabstand und die Betondeckung. Der Tragwerksplaner, der für die Ausbildung des Bewehrungskorbs verantwortlich ist, soll die Anforderungen für den erfolgreichen Betoneinbau berücksichtigen und insbesondere auf den projektspezifischen sowie den Mindestanforderungen aus den gegebenen Normen gerecht werden. Die Bewehrungsführung muss also den Erfordernissen der Tragwerksplanung sowie der Ausführung im gleichen Maße genügen wie der Mischungsentwurf des Betons. Dafür kann es sinnvoll sein, dass der planende Ingenieur weitere fachkundige Beratung sucht.

2.2 Lichter Abstand der Bewehrung

Der lichte Abstand der Bewehrung (als „a“ in Abbildung 3 gekennzeichnet) muss vom Tragwerksplaner sowohl aus statischen Erfordernissen als auch bezüglich der Anforderung, dass der Beton durch die horizontalen und vertikalen Bewehrungsstäbe des Bewehrungskorbes fließen muss, beurteilt werden.

Gemäß Eurocode 2 (EN1992-1) sollte der statisch notwendige lichter Abstand zwischen den einzelnen vertikalen Bewehrungsstäben oder den Bündeln an Bewehrungsstäben mindestens dem doppelten Durchmesser D_s oder dem Nenndurchmesser $D_{s,n}$ entsprechen (siehe *Tabelle E.1* in *Anhang E*).

Für die Ausführung muss der lichte Abstand zwei Anforderungen erfüllen, die beide auf den Betoneigenschaften beruhen. Zum einen soll Beton – als Bingham Fluid verstanden – durch die Bewehrung fließen können und zum anderen soll das Blockieren der Gesteinskörnung des Betons vermieden werden:

$$a \geq \max \begin{bmatrix} \min a \\ 4 \text{ x } D_{max} \end{bmatrix}$$

ACI336.1 erfordert einen minimalen lichten Abstand, min a, für vertikale Bewehrungsstäben größer oder gleich 100 mm, auch in Bereichen mit Übergreifungsstößen, oder viermal den maximalen Gesteinskorndurchmesser D_{max}. Der größere der beiden Werte ist hierbei maßgebend. EN206, EN1536 und EN1538 spiegeln die Anforderungen der ACI wider, jedoch ermöglichen diese einen reduzierten lichten Abstand für vertikale Bewehrungsstäben von 80 mm in Bereichen mit

Übergreifungsstößen. Voraussetzung hierfür ist aber, dass die zweite Anforderung zum größten Korndurchmesser der Gesteinskörnung erfüllt ist. Diese und weitere Anforderungen sind in *Tabelle E.1* und *Tabelle E.2* in *Anhang E* zusammengefasst.

Um den Betonfluss in die Betondeckungszone zu gewährleisten, wird ein minimaler lichter Abstand der vertikalen Bewehrungsstäbe von 100 mm, auch in Bereichen mit Verbindungsstößen, empfohlen. Dies kann durch die Erhöhung des lichten Abstandes im nomalen Bereich außerhalb der Verbindungsstöße, durch die Verwendung von Muffen oder dadurch erreicht werden, dass die vertikalen Bewehrungsstäbe so gekrümmt werden, dass die Übergreifung ausgehend von der Mitte des Elementes radial ist.

Der lichte Abstand der horizontalen Bewehrung sollte separat berücksichtigt werden, da diese Bewehrungsstäbe den horizontalen und vertikalen Fluss des Betons behindern können. Normative Anforderungen bezüglich eines minimalen lichten Abstandes für horizontale Bewehrungsstäbe sind in *Tabelle E.1* und *Tabelle E.2* in *Anhang E* zusammengefasst.

Eine mehrlagige Bewehrung sollte vermieden werden, um nachteilige Effekte für den Betonfluss zu reduzieren. Eine mehrlagige Bewehrung sollte, sofern möglich, durch eine Bündelung von Bewehrungsstäben, größere Stabdurchmesser oder eine höhere Stahlgüte kompensiert werden. Ist eine mehrlagige Bewehrung nicht zu vermeiden, sollte der minimale lichte Abstand, min a, erhöht werden. Zudem werden in diesem Falle Vorversuche empfohlen.

Statt sehr hoher Bewehrungsdichten in Tiefgründungselementen sollten häufig besser die Elemente vergrößert werden.

Hinweis: neben der Reduzierung der Risiken bezüglich Qualität und Integrität des Endproduktes können größere Elementgrößen, in Abhängigkeit der relativen Kosten des Betons und der Bewehrung, auch wirtschaftlicher sein.

Herstelltoleranzen bei der Produktion des Bewehrungskorbs sollten ebenfalls bei der Bemessung berücksichtigt werden.

2.3 Betondeckung

In Bezug auf die Betondeckung für Tiefgründungen existieren zwei unabhängige Anforderungen, die bereits bei der Planung zu berücksichtigen sind. Die erste Anforderung deckt die Notwendigkeit einer bestimmten Betondeckung über die Nutzungsdauer des Bauteils ab. Die zweite Anforderung betrifft die Notwendigkeit einer Mindestbetondeckung während des Einbaus, um den Betonfluss und auch das Ziehen der temporären Verrohrung zu gewährleisten. Diese beiden Ansätze sind unabhängig und daher nicht zwangsläufig kompatibel.

Für beide Anforderungen sollte der Planer ein Nennmaß der Betondeckung, c_{nom}, basierend auf einer Mindestbetondeckung, c_{min}, und einem Vorhaltemaß der Betondeckung zur Berücksichtigung unplanmäßiger Abweichungen, Δc_{dev}, festlegen (auch in *Abbildung 3* dargestellt):

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{mit} \quad c_{min} \geq \max \begin{bmatrix} c_{min,Bemessung} \\ c_{min,Ausführung} \end{bmatrix}$$

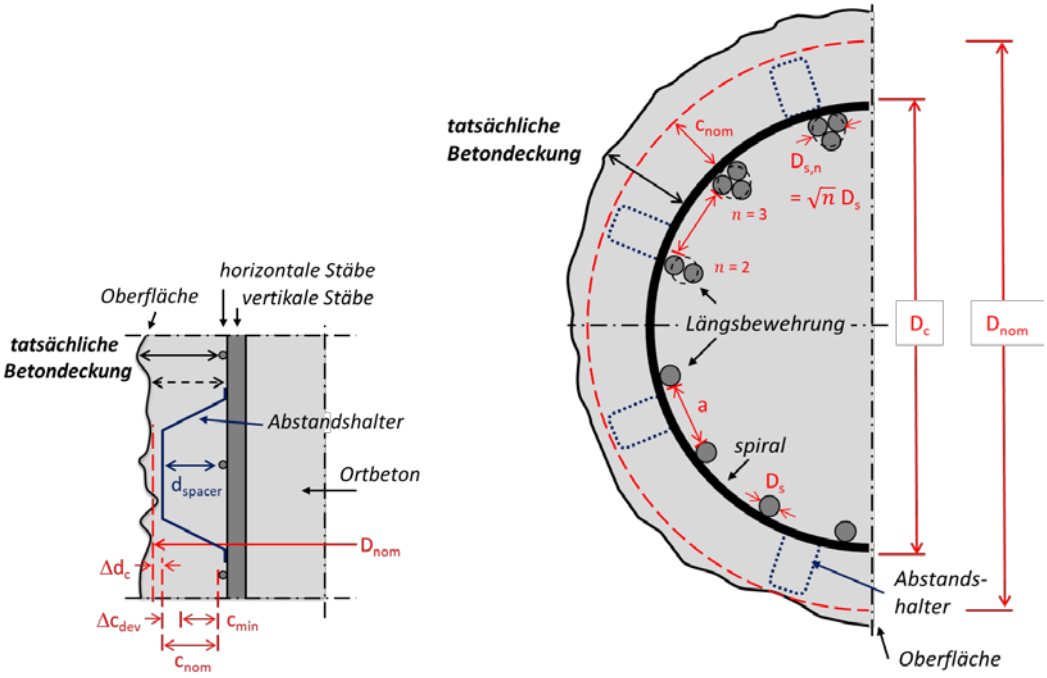
Für die Ausführung wird ein Nennmaß der Betondeckung (c_{nom}) von 75 mm empfohlen, welches sich aus einer Mindestbetonabdeckung (c_{min}) von 50 mm und einem Vorhaltemaß der Betondeckung zur Berücksichtigung unplanmäßiger Abweichungen (Δc_{dev}) von 25 mm zusammensetzt. In den meisten Fällen wird die Mindestbetondeckung für die Ausführung jener Mindestbetondeckung aus konstruktiven, statischen und dauerhaftigkeitsrelevanten, Anforderungen überschreiten.

Hinweis: in Anhang E wird die aktuelle Abweichung normativer Regelungen im Detail diskutiert. EN 1536 und FHWA GEC 10 identifizieren auch bestimmte Fälle, in denen das minimale Nennmaß der Betondeckung erhöht werden muss oder soll.

Abstandhalter haben in aller Regel die Aufgabe, das jeweilige festgelegte Nennmaß der Betondeckung sicherzustellen. Auch sollte eine zusätzliche Toleranz, $\Delta d_{c,}$ in der Gestaltung des Bewehrungskorbes berücksichtigt werden sollte, um den Einbau des Bewehrungskorbes den ausgehobenen Schaft zu ermöglichen (siehe *Abbildung 3*):

$$D_c = D_{nom} - 2\,c_{nom} - 2\,\Delta d_c$$

Abbildung 3: Betondeckung und Bewehrungsabstand in Tiefgründungen (auch auf rechteckige Bewehrungskörbe anwendbar)



Hinweis: Der Fall eines verrohrten Bohrpfahls wird in Anhang E dargestellt und diskutiert

3 Eigenschaften des Kontraktorbetons

3.1 Allgemein

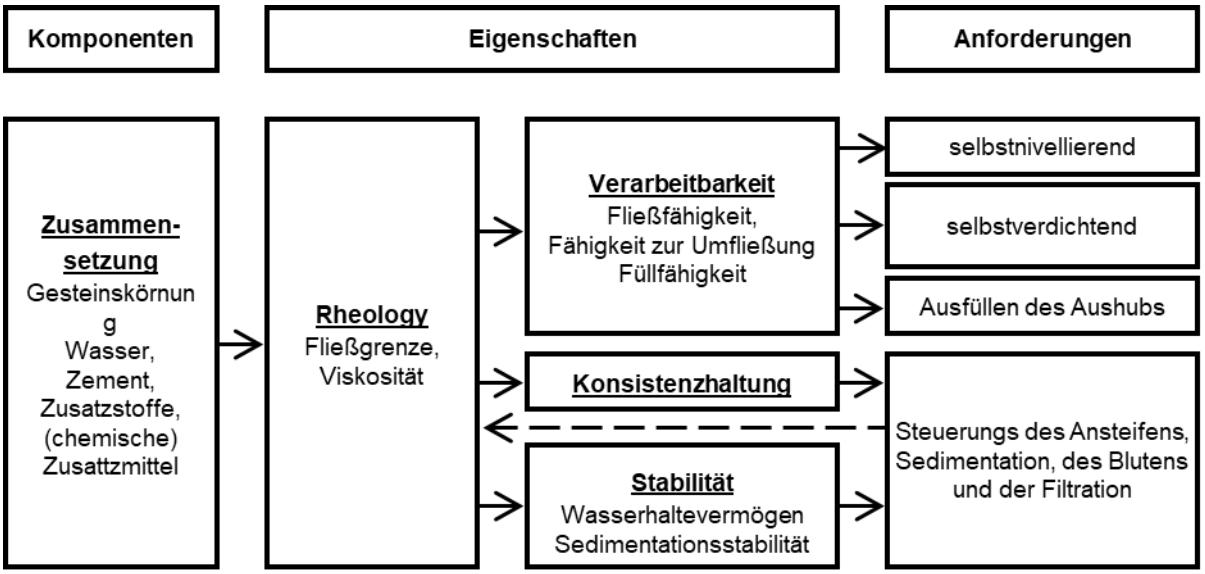
Die Rheologie des Betons hat einen wesentlichen Einfluss auf den Betonfluss. Die Rheologie entscheidet damit über den Betoniererfolg und die Qualität des Endproduktes, so ist etwa die Dauerhaftigkeit eine direkte Funktion der Rheologie.

Die wichtigsten rheologischen Eigenschaften von Frischbeton sind:

- Verarbeitbarkeit (Grundbegriff für die Fähigkeit des Betons Hohlräume auszufüllen, Hindernisse zu umfließen und sich unter Eigengewicht selbst zu verdichten)
- Konsistenzhaltung (beschreibt, über welche Dauer ausreichende Frischbetoneigenschaften beibehalten werden)
- Stabilität (Widerstand gegen Sedimentation, Bluten und Filtration)

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Betontechnologie wesentlich weiterentwickelt. Der Betonentwurf beinhaltet, zusätzlich zu den Festigkeitsanforderungen, normalerweise Dauerhaftigkeitsanforderungen. Da die Dauerhaftigkeit und die Festigkeit, für eine gewisse Zusammensetzung von Ausgangsstoffen, direkt miteinander korrelieren, besteht die Tendenz zur Festlegung auch einer höheren Festigkeit und geringerer w/z-Werte. Hiermit resultiert eine größere Abhängigkeit von (chemischen) Zusatzmitteln, welche den geringeren Wassergehalt und die damit verbundene verminderte Verarbeitbarkeit kompensieren müssen. Zudem müssen diese den konkurrierenden Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, Konsistenzhaltung und Stabilität genügen. Eine unzureichende Stabilität oder Konsistenzhaltung können wiederum die Verarbeitbarkeit beeinflussen. Der Zusammenhang zwischen Ausgangsstoffen, elementaren rheologischen und abgeleiteten Betoneigenschaften und den allgemeinen Leistungsanforderungen von Beton ist in *Abbildung 4* dargestellt.

Abbildung 4: Abhängigkeiten zwischen der Zusammensetzung, der Rheologie und zugehörige Eigenschaften und den allgemeinen Anforderungen



In aktuellen Regelwerken finden sich kaum Orientierungshilfen zur Beurteilung des rheologischen Verhaltens. Dieses Kapitel erläutert die Rheologie des Betons und wesentliche Parameter, die zur Identifizierung der Rheologie eingesetzt werden.

3.2 Rheologie und Verarbeitbarkeit

Um das Verhalten von Beton im frischen Zustand zu verstehen, ist es sinnvoll diesen als Bingham-Fluid (rheologisches Modell mit zwei Parametern) zu betrachten:

- Fließgrenze, τ_0
- plastische Viskosität, μ

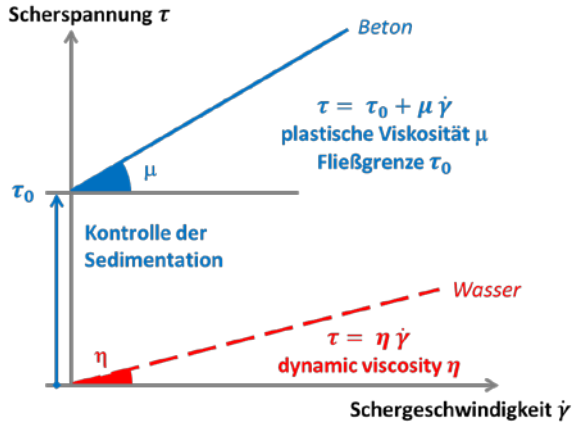
Die *Fließgrenze* definiert jene Scherspannung, die erforderlich ist, um das Fließen von Beton auszulösen. Um eine Sedimentation des Frischbetons zu vermeiden, darf die Fließgrenze nicht zu gering sein. Umgekehrt darf die Fließgrenze nicht zu hoch sein, um ein Selbstverdichten des Betons (ohne externen Energieeintrag etwa durch Vibration) zu ermöglichen.

Die *plastische Viskosität* ist die Steigung einer Bingham-Fluidkurve, wie in *Abbildung 5* dargestellt, und ist ein Maß für dessen Widerstand gegen Fließen. Sie steht im Zusammenhang mit den granularen Interaktionen zwischen den Partikeln der Gesteinskörnung und der Viskosität des Zementleins. Ein erfolgreicher Einbau des Betons erfordert eine geringe Viskosität, da dies die Verteilung des Betons im Element und die Zeitdauer zur Einbringung des Betons beeinflusst.

Praktisch sind sowohl die Fließgrenze als auch die plastische Viskosität zeit- und scherspannungsabhängig.

Abbildung 5 zeigt, dass ein gewisser Energieeintrag erforderlich ist, bevor Beton zu fließen beginnt (Fließgrenze) und dass der Beton hiernach einen Widerstand gegen dieses Fließen aufbringt (Viskosität).

Abbildung 5: Klassisches Verhalten eines Bingham Fluids (z.B. Beton) und eines Newtonschen Fluids (z.B. Wasser)



Die aktuell in der Praxis verwendeten Prüfverfahren, mit denen im Rahmen von Konformitäts- und Kontrollprüfungen vorgegebene Frischbetoneigenschaften ermittelt werden, können nicht zwischen den o.g. wesentlichen rheologischen Parametern (Fließgrenze und plastische Viskosität) unterscheiden. Diese Werte können derzeit nur mit einem Laborprüfgerät (z.B. Beton-Rheometer) ermittelt werden. Bisher wurde das Fließvermögen – als Maß für die Viskosität – oft intuitiv und qualitativ während des Betonierens abgeschätzt, z. B. durch die Beurteilung und Klassifizierung des Betonflusses durch das Betonierrohr oder der Entladezeit der Mischfahrzeuge.

Hinweis 1: In diesem Leitfaden werden sowohl die dynamische Viskosität als auch die plastische Viskosität eines Bingham-Fluids mit dem allgemeinen Begriff Viskosität bezeichnet.

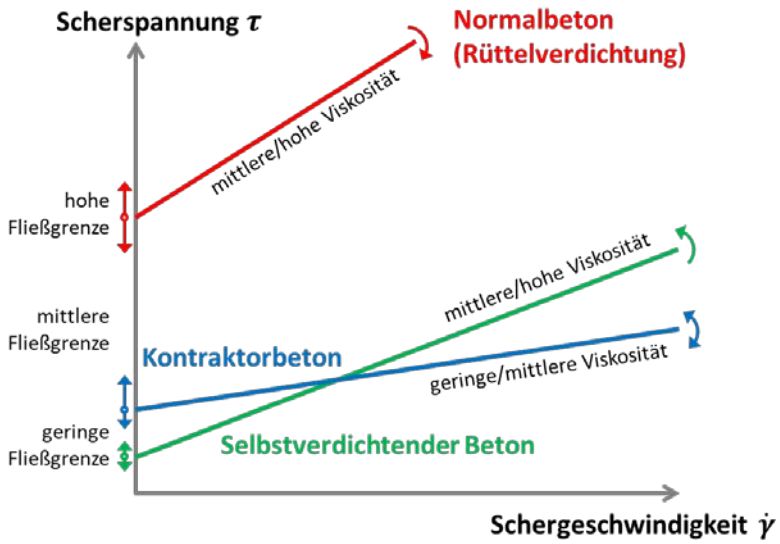
Hinweis 2: Das F&E-Projekt zur Rheologie von Kontraktorbeton in Europa und den Vereinigten Staaten (Kraenkel and Gehlen, 2018) hat eine eindeutige Korrelation zwischen der Fließspannung und der plastischen Viskosität nachgewiesen. Diese wurden mittels Rheometer und einfachen und praktischen Prüfverfahren beurteilt (siehe Abschnitt 5.2).

Abbildung 6 stellt einen qualitativen Vergleich der Rheologie, vertreten durch die Fließgrenze und die Viskosität, für unterschiedliche Betonsorten und Anwendungsgebiete dar.

Normalbeton, welcher mechanisch (i.d.R. mit Rüttlern) verdichtet wird, weist sowohl eine hohe Fließgrenze als auch eine hohe Viskosität auf. Selbstverdichtender Beton erfordert hingegen eine sehr geringe Fließgrenze zum Selbstnivellieren und zum Selbstverdichten. Die Fließgrenze von Kontraktorbeton in Tiefgründungen liegt zwischen den beiden und muss zwischen einer relativ geringen Fließgrenze für eine gute Füllfähigkeit und einer höheren Fließgrenze, um die Stützflüssigkeit zu verdrängen und die Entmischung zu kontrollieren, ausbalanciert werden. Der hohe hydrostatische Druck, welcher beim Betoneinbau in Tiefgründungen existiert, fördert die Verdichtung und erübrigt die Erfordernis einer sehr geringen Fließgrenze, welche zu wenig robusten (sensitiven) Betonmischungen führen könnte.

Die Viskosität kann in Abhängigkeit der gewählten Mischungszusammensetzung stark variieren. Im Allgemeinen sollte die Viskosität für Kontraktorbeton gering sein. Dies dient sowohl der verbesserten Fließfähigkeit von Beton um die Bewehrung und andere Hindernisse als auch der Verringerung der erforderlichen Zeit für den gesamten Einbau. Zusätzlich zu den allgemeinen Vorteilen kann eine Verringerung der Einbauzeit die Notwendigkeit zur Verlängerung der Verarbeitbarkeit und das damit einhergehende Risiko einer erhöhten Mischungssensitivität verringert oder gar vermieden werden.

Abbildung 6: Qualitativer Vergleich der Rheologie für unterschiedliche Betonsorten



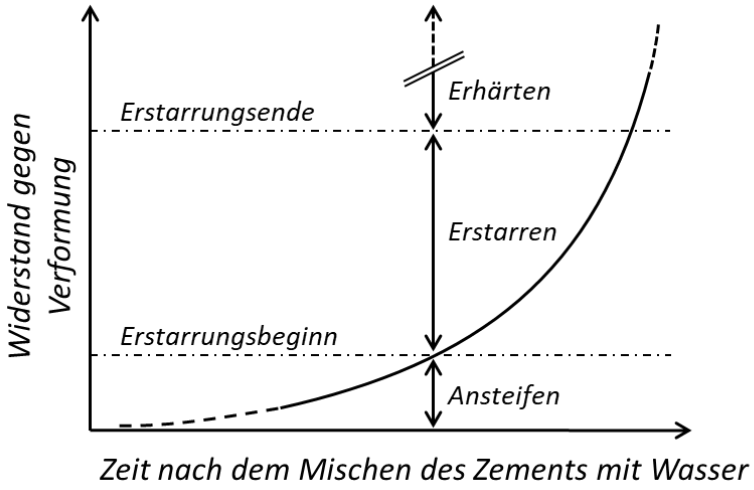
Frischbeton kann als thixotropes Materialverstanden werden, das ein reversibles Ansteifverhalten aufweist, beim Aufbringen einer Scherspannung aber seine (ursprüngliche) Fließfähigkeit zurückerlangt. Dieses Verhalten wird durch das Absetzen und Verdichten von Partikeln im Ruhezustand und den darauffolgenden Zusammenbruch dieser Struktur beim Aufbringen einer Scherspannung verursacht.

Es ist wichtig die Thixotropie des Betons unter Kontrolle zu halten, da sich eine übermäßige Thixotropie negativ auf die Fließfähigkeit des Betons bei Wiederaufnahme des Betoniervorgangs – nach einer kurzen Unterbrechung – auswirken kann. Zurzeit existieren hierfür aber keine anerkannten

Maßnahmen oder Anforderungskriterien. Eine praktische Maßnahme könnte die Begrenzung der Fließgrenze nach einer definierten Ruhezeit sein, siehe *Anhang A.5* und *Anhang A.6.*

Die Konsistenzhaltung muss ebenfalls beachtet werden, da es einen Zeitpunkt gibt, nachdem der Beton nicht mehr gestört werden sollte, weil das Ansteifen dann hauptsächlich auf eine irreversible Hydratation des Zementes zurückzuführen ist (Roussel, 2012). Dieses ist in *Abbildung 7* dargestellt.

Abbildung 7: Ansteifen und Erstarren von Beton über die Zeit



3.3 Stabilität des Betons

Die Stabilität des Frischbetons ist als Fähigkeit zur Rückhaltung von Wasser (Filtration und Bluten) und Widerstand gegenüber Sedimentation (statische Entmischung) definiert. Die Notwendigkeit zur Kontrolle der Stabilität sollte gegen die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit ausbalanciert werden.

Nach dem Einbau des Betons sinkt die Scherrate auf null. Der Beton behält seine rheologischen Frischbetoneigenschaften wie zum Beispiel seine Fließgrenze, jedoch werden sich diese über die Zeit verändern (z.B. aufgrund einer Veränderung der Wirksamkeit der Zusatzmittel). Filtration, Bluten und Sedimentation können alle weiterhin stattfinden, solange der Beton ansteift (siehe *Abbildung 7 und 13*). Dies ist maßgeblich für Betone mit längeren Erstarrungszeiten, insbesondere bei großen Betonagen mit Beton mit einer langen Konsistenzhaltung.

Die Stabilität des Betons kann die Qualität und die Integrität des Endproduktes direkt, aber auch indirekt durch ihren Einfluss auf den Fließmechanismus. Wenn die rheologischen Eigenschaften von Beton durch ein besonders hohes Maß an Filtration oder Bluten beeinflusst worden sind, wird dies wiederum das tatsächliche Fließverhalten von Beton beeinflussen, zum Beispiel wenn dieser durch später eingebrachten Beton verdrängt werden muss (siehe *Abbildung 4*).

Es gibt zwei Mechanismen für den Wasserverlust von Frischbeton, die grob wie folgt beschrieben werden können:

- Filtration: Trennung des Wassers vom Beton durch „Auspressen“ unter dem wirksamen hydrostatischen Druck
- Bluten: durch die Gravitationskraft herbeigeführte Separierung des Wassers vom Zementleim und der Gesteinskörnungsmatrix

In der Praxis wird ein gewisser Wasserverlust von Frischbeton immer stattfinden und resultiert wahrscheinlich meist aus einer Kombination dieser beiden Mechanismen. Auch die Sedimentation kann nicht komplett eliminiert werden und so ist es unabdingbar die Mechanismen zu verstehen, um die Stabilität mit der Verarbeitbarkeit auszubalancieren. Filtration, Bluten und Sedimentation werden im Folgenden detaillierter beschrieben. *Kapitel 4* dieses Leitfadens zum Betonmischungsentwurf umreißt zudem mögliche Maßnahmen zur Minimierung von Stabilitätsproblemen.

<u>Filtration</u>

Frischbeton in Tiefgründungen ist hohen hydrostatischen Drücken aufgrund der darüberliegenden Betonsäule ausgesetzt. Dies führt zu hohen Porenwasserdrücken im Frischbeton, welche mit der Tiefe zunehmen. Die Porenwasserdrücke des Betons können viel höher als der Wasserdruck im umgebenden Erdreich sein. Es entsteht ein hydraulischer Gradient welches zum Auspressen von Wasser aus dem Beton führt. Mit diesem Wasserverlust geht ein verstärktes Ansteifen des Betons einher, d.h. die rheologischen Eigenschaften ändern sich hin zu einer höheren Fließgrenze und einer höheren Viskosität.

Filtration kann insbesondere dann relevant sein, wenn ein Bewehrungskorb oder eine Fertigteilstütze nach dem Betonieren eingebaut werden muss und der Beton gleichzeitig in einer wasserdurchlässigen Bodenschicht aufgrund der Filtration erheblich ansteifen kann. In diesen Fällen sollte die Filtration bei der Betonentwicklung besonders berücksichtigt werden.

Hinweis: Neuere Forschungsergebnisse (Azzi, 2016 and Dairou et al, 2015) deuten an, dass der Wasserverlust aus Filtration als Indikator für das gesamte Blutpotenzial verwendet werden kann (siehe nachfolgenden Abschnitt zum Thema Bluten). Weitere Forschung ist aber notwendig, um die Randbedingungen zu definieren und zu validieren (z.B. die Konsolidierung des Betons und die Zusammensetzung des entstehenden Filterkuchens).

Anhang A beinhaltet weitere Informationen zur Prüfung der Filtration von Frischbeton. Abschnitt 5.2 empfiehlt Annahmekriterien für den Fall, dass die Filtration relevant ist.

Bluten

Das Bluten von Frischbeton ist eine spezielle Form der Sedimentation, welche eintritt, nachdem der Beton zur Ruhe gekommen ist. Dichteunterschiede in den Ausgangsstoffen resultieren in höhere Wasserdrücke im Frischbeton, welche den hydrostatischen Wasserdruck überschreiten. Dies führt zu einem vertikalen hydraulischen Gradienten, welches das Wasser im Zementleim zum vertikalen Fließen in Richtung der Betonoberfläche führt. Hierbei können bevorzugte Fließwege im Beton entstehen, die in Abhängigkeit verschiedener Parameter in ihrer Größe und Häufigkeit variieren.

Hinweis 1: Sichtbare Fließwege des Wassers werden häufig als Blutkanäle bezeichnet (siehe Anhang D)

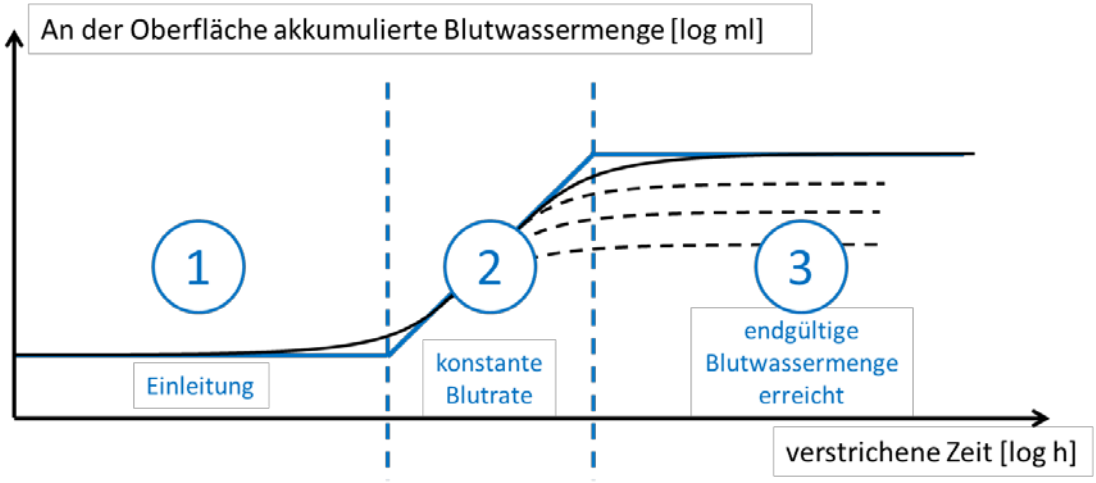
Hinweis 2: Die Fließgeschwindigkeit in den Fließwegen oder Blutkanälen kann ausreichend sein, um feine Gesteinskörnung oder Zementleim mitzuschleppen.

Um das Risiko der Entstehung von Anomalien, aufgrund der oben beschriebenen Effekte zu minimieren, sollte das Bluten beachtet werden.

Neuere Forschungen (Massoussi et al, 2017) haben die folgenden drei Phasen des Blutens identifiziert (siehe *Abbildung 8*):

- Einleitungsphase
- Phase mit konstanter Blutrate
- Phase, in der die endgültige Blutwassermenge erreicht ist

Bild 8: Schematisches Diagramm zum Blutprozess im Zementleim (basierend auf Massoussi et al., 2017), mit der möglichen Unterbrechung des Blutens durch Ansteifen



Das Ausmaß des Blutens bei Tiefgründungen hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem, aber nicht ausschließlich von der Sieblinie der Gesteinskörnung, der Wirksamkeit der Zusatzmittel über die Zeit, der Gesamthöhe des Betons, dem Verhältnis von Wasser zu Feinanteilen und vom Zeitpunkt, wenn der Beton seine endgültige Konsolidierung erreicht hat.

Hinweis 1: Der Beton könnte aufgrund des Ansteifens seine vollständige Konsolidierung nicht erreichen, womit auch das Bluten gestoppt würde bevor sich das gesamte potentielle Blutwasser abgesondert hat. Eine Unterscheidung kann daher zwischen dem Blutvermögen und dem tatsächlichen Bluten unter gegebenen Dränagebedingungen getroffen werden.

Hinweis 2: Durch die Hydratation des Zementes kann das Blutwasser (teilweise) resorbiert werden.

Hinweis 3: Kleinmaßstäbliche Blutversuche, wie in Anhang A.9 beschrieben, können nicht mit realmaßstäblichen Prozessen in Tiefgründungen korreliert werden. Daher kann es hilfreich sein, mit Filtrationsversuchen unter Druck das gesamte Blutpotential zu bestimmen (Anhang A.10).

Anhang A gibt Informationen zu Prüfverfahren für das Bluten von Frischbeton und *Abschnitt 5.2* empfiehlt Anforderungswerte, falls relevant.

Das Bluten ist eine grundlegende Betoneigenschaft. Für Kontraktorbetone ist aber das Bluten unter sehr hohem hydrostatischen Betondruck maßgebend, welches zu hohen Wasserdrücken im Beton führt, die signifikant höher als der hydrostatische Wasserdruck sind. Wenn daher das Blutvermögen im Rahmen von Eignungsprüfungen geprüft werden soll, wird empfohlen zusätzlich Filtrationsversuche (unter Druck) durchzuführen.

Sedimentation

Frischbeton für Tiefgründungen ist auf seine Fließgrenze angewiesen, um seine Stabilität nach dem Betoniervorgang aufrechtzuerhalten. In Betonen mit einer relativ geringen Fließgrenze können die relativ schweren und großen Gesteinskörner durch den leichteren Zementleim absinken. Dies führt zu einer Abstufung der Ausgangsstoffe im Beton über die Tiefe. Dieser Prozess wird auch als statisches Entmischen bezeichnet.

Hinweis 1: Fallbeispiele der Sedimentation werden durch Thorp et al (2018) beschrieben. Hierbei wurde eine stark verzögerte Betonmischung (verzögerter Erstarrungszeitpunkt) auf statische Entmischung nach der Erhärtung untersucht (siehe Bemerkungen in A.7).

Hinweis 2: Eine Entmischung kann auch aufgrund dynamischer Effekte während des Transports und Einbaus eintreten. Ein dynamisches Entmischen beschreibt den Mechanismus, bei dem eine Betonmischung ihre homogene Zusammensetzung verliert. Ein ausreichender Widerstand gegen dynamische Effekte kann im Mischungsentwurf i.d.R. durch eine geeignete Zusammensetzung und gute Kohäsion des Kontraktorbetons erreicht werden.

Anhang A gibt Informationen über Prüfverfahren für die Sedimentation von Frischbeton und Abschnitt 5.2 empfiehlt Anforderungswerte, falls relevant.

4 Mischungsentwurf des Betons

4.1 Einleitung

Die Darstellung der allgemeinen Prinzipien für das Entwerfen von Betonmischungen mit geeigneter Zusammensetzung gehört nicht zum Anwendungsbereich dieses Leitfadens. Diesbezüglich wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen, z.B. 'Concrete Technology' von Neville und Brooks (2010). Typische Schritte bei der Entwicklung des Mischungsentwurfes sind wie folgt:

1) Bestimmung der mittleren einaxialen Druckfestigkeit, ausgehend von der erforderlichen charakteristischen mechanischen Eigenschaft (in der Regel der einaxialen Druckfestigkeit, engl. UCS) und wird basierend auf statistischen Betrachtungen (vorangegangene Erfahrung und erwartungsgemäße Standardabweichung).
2) Auswahl des Größtkorns der Gesteinskörnung, basierend auf dem Bewehrungsabstand (und ggf. weiteren Vorschriften) und Überprüfung des Mischungsentwurfes mit besonderem Augenmerk auf eine geeignete Verarbeitbarkeit in Bezug auf die Bewehrungsführung (lichter Abstand zwischen Bewehrungsstäben, Betondeckung, etc.).
3) Dosierung des Bindemittels basierend auf festigkeits- und dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen, ggf. mit Ersatz von Zement durch Zusatzstoffe zur Begrenzung der Wärmeentwicklung und der Temperaturgradienten in größeren Bauteilen oder aus wirtschaftlichen Gründen.
4) Auswahl des Wasser-Zement-Werts in Abhängigkeit der konstruktiven- und dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen.
5) Auswahl der notwendigen Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit der Betoneinbaumethode.
6) Abschätzung der notwendigen Zugabewassermenge in Abhängigkeit der Verarbeitbarkeit, des Größtkorns und der Kornform, vom Luftgehalt und verflüssigenden Zusatzmitteln.
   Hinweis: Luftporenbildner sollten für Kontraktorbeton nicht verwendet werden, da die Luft in Tiefgründungen komprimiert wird und die Eigenschaften der Betone verändert (Feys, 2018).
7) Ermittlung des notwendigen Zement- oder Bindemittelgehalts in Abhängigkeit des gewählten Wasser-Bindemittel-Werts und der erforderlichen Zugabewasserdosierung.
8) Berechnung der Gesamtmenge an Gesteinskörnung basierend auf der Stoffraumgleichung sowie auf deren Sieblinie und Sandgehalt.
9) Einschätzung der Art und Menge an Zusatzmitteln, die zur Regulierung der Verarbeitbarkeitszeit des Betons hinzugegeben werden müssen, in Abhängigkeit der Temperatur und der erforderlichen Gesamtzeit für Lieferung und Einbau
10) Einschätzung der Art und Menge an Zusatzmitteln, die zur Regulierung der (rheologischen) Frischbeton- oder anderen Eigenschaften hinzugegeben werden müssen.

Betonlieferanten haben in der Regel eine Bandbreite an erprobten Betonmischungen. Einer dieser Mischungsentwürfe kann als Ausgangspunkt verwendet werden und nach Bedarf modifiziert werden.

Die Anmerkungen in Abschnitt 4.2, 4.3 und 4.4 sollen kritische Themen für Kontraktorbeton hervorheben.

4.2 Überlegungen zum Mischungsentwurf

Der Betonmischungsentwurf ist ein komplexer Prozess, welcher den Anforderungen aus der Betonfestlegung mit den verfügbaren Ausgangsstoffen in Einklang bringen muss. Bei der Auswahl und Dosierung der Ausgangsstoffe sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Spezifikation des Betons / geforderte Betoneigenschaften
- Ressourcenverfügbarkeit, -variabilität und Wirtschaftlichkeit
- Effizienz der Betonmischanlage und Kontrollmöglichkeiten im Betonwerk
- zu erwartende Umgebungsbedingungen zum Zeitpunkt des Betoneinbaus

- Logistik der Betonherstellung, des Betontransports und des Betoneinbaus

Nach der Beurteilung oben genannter Punkte sollte eine Vorauswahl der Ausgangsstoffe und Mischungszusammensetzung folgende Punkte berücksichtigen:

- Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit (und ggf. weitere Eigenschaften)
- ausreichende Verarbeitbarkeit und Verarbeitbarkeitszeit
- Mischungsstabilität (Widerstand gegen Entmischung inklusive Bluten)
- Herkunft, Größtkorn, Kornform (gebrochen oder rund) und Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung
- Zementart und Zementgehalt
- Verwendung von Zusatzstoffen und dessen Kombination (siehe Anhang B)
- Wassergehalt
- Wasser/Zement-Wert
- geeignete Zusatzmittel
- Sensitivität der Betonmischung gegenüber Abweichungen bei den Ausgangsstoffen (d.h. deren Reproduzierbarkeit im normalen Produktionsverlauf)

Andere geforderte Betoneigenschaften können aus besonderen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, wie etwa aus einer Lebensdauerbemessung, resultieren. Gegebenenfalls müssen konkrete Anforderungen wie zum Beispiel eine Begrenzung des Chloriddiffusionskoeffizienten berücksichtigt werden. Eine hieraus resultierende Notwendigkeit spezieller Ausgangsstoffen, höherer Dosierungen an Feinststoffen, eines sehr geringen Wasserzementwerts o. ä. beeinflussen wiederum die Frischbetoneigenschaften. Widersprüchliche Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und den Einbau müssen bei der Entwicklung des Mischungsentwurfes gegeneinander abgewogen werden.

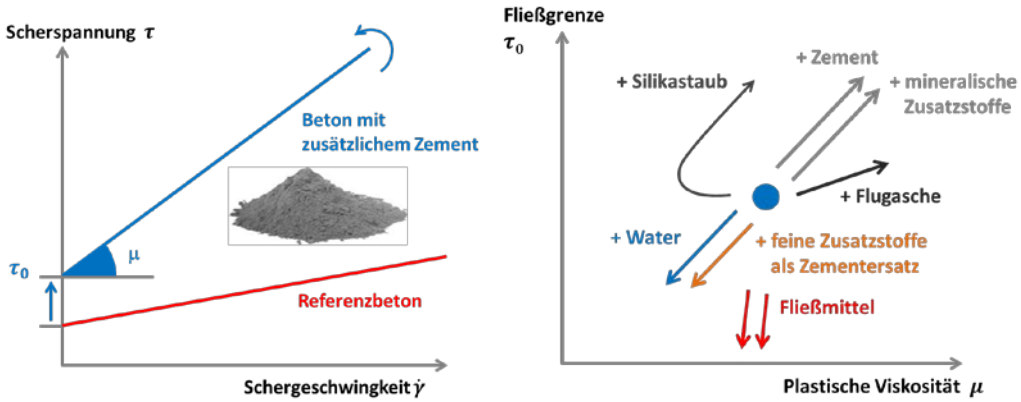
Die Entwicklung des Mischungsentwurfes beginnt normalerweise im Labor. Nach erfolgreichen Laboruntersuchungen und Sensitivitätsstudien können großmaßstäbliche Feldversuche stattfinden. Mit der Weiterentwicklung sowie der endgültigen Freigabe der Mischung seitens aller Beteiligten werden Akzeptanzkriterien für die Übergabe des Betons auf der Baustelle festgelegt.

4.3 Ausgangsstoffe

Die Betonrheologie wird durch alle Ausgangsstoffe und deren Zusammensetzung beeinflusst. Insbesondere durch die Eigenschaften der Gesteinskörnung, v.a. der Kornform und der Korngrößenverteilung, der Zementart und der Zusatzstoffwahl und -menge, durch den Wasser/Zement-Wert und die Zusatzmittelart und -dosierung werden die rheologischen Eigenschaften des Betons beeinflusst.

Der Einfluss des Zementes auf die rheologischen Eigenschaften des Betons ist in *Abbildung 9* links dargestellt. Durch eine Zugabe von Zement erhöhen sich die Fließgrenze sowie die Viskosität. Der Einfluss unterschiedlicher Betonausgangsstoffe auf die Fließgrenze und Viskosität ist zusammenfassend in *Abbildung 9* rechts dargestellt.

Abbildung 9: Einfluss des Zementes und anderer Ausgangsstoffe auf die Rheologie (basierend auf Wallevik, 2003)



Eine Betonmischung muss den Normanforderungen sowie den projektbezogenen Spezifikationen entsprechen, z.B. w/z-Wert, Mehlkorngehalt, Mindestdruckfestigkeit usw.

Um einen Beton mit einer besseren Verarbeitbarkeit zu erhalten, d.h. um die Viskosität und/oder die Fließgrenze zu reduzieren, können folgende Maßnahmen geeignet sein:

- teilweiser Ersatz des Zementes durch sehr feine Zusatzstoffe (signifikant feiner als Zement)
- Anpassung der Sieblinie der Gesteinskörnung
- Zugabe eines Betonverflüssigers oder Fließmittels
- Erhöhung des Wassergehaltes oder des Leimvolumens

Hinweis: es ist bewährte Praxis, die Zugabe eines Betonverflüssigers oder Fließmittels zu begrenzen, um eine übermäßige Sensitivität des Betons gegenüber geringen Änderungen im Wassergehalt oder anderen Ausgangsstoffen (z.B. Sand) zu vermeiden, da diese zu einer unzureichenden Stabilität der Betonmischung führen könnten.

Um eine stabilere Betonmischung zu erhalten, d.h. die Viskosität und/oder die Fließgrenze zu erhöhen, um die Neigung des Betons zur statischen Entmischung und zum Bluten zu reduzieren, können folgende Maßnahmen geeignet sein:

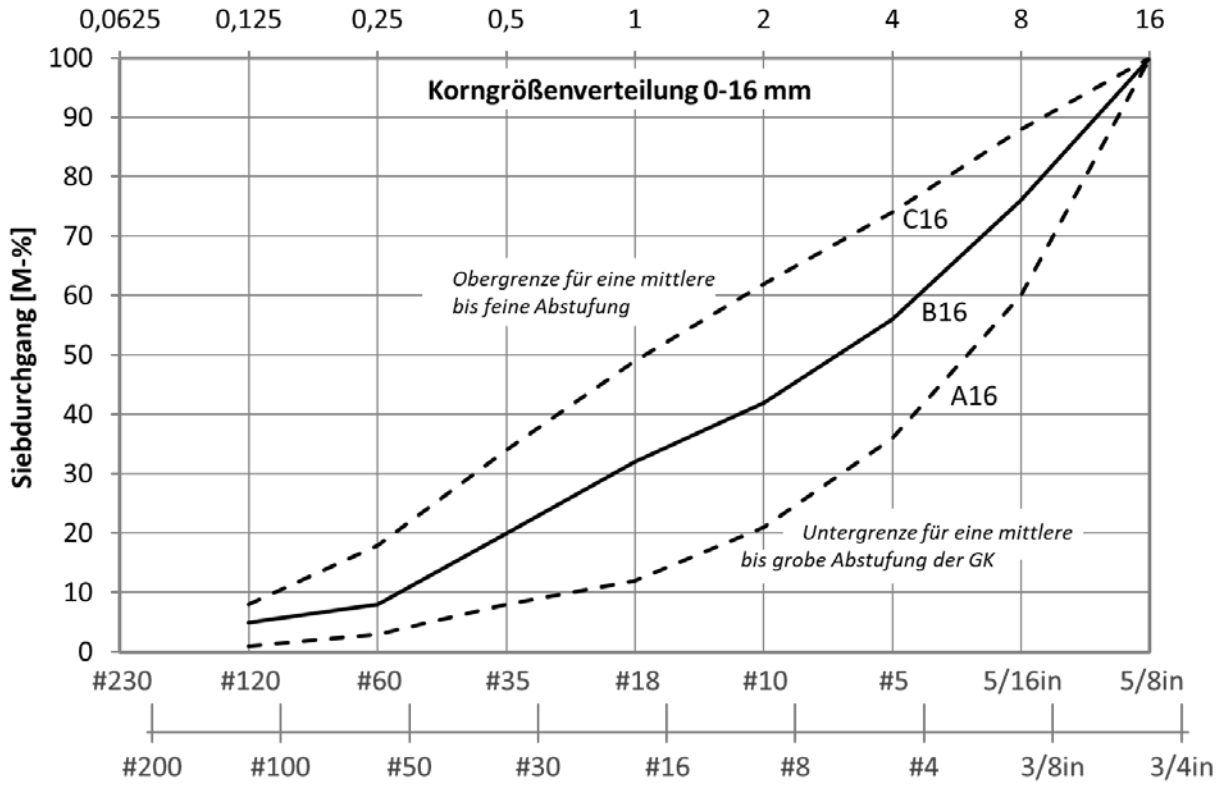
- Reduktion der Wassermenge und/oder Zugabe von Zement oder inerten Zusatzstoffen, z.B. Kalksteinmehl
- Zugabe von Flugasche, die im Allgemein einen größeren Einfluss auf die Viskosität als auf die Fließgrenze hat
- Anpassung der Sieblinie der Gesteinskörnung
- Zugabe eines viskositätserhöhenden Zusatzmittels

Hinweis: Silikastaub kann in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle einnehmen. Dieser Zusatzstoff wird manchmal gefordert, um z.B. eine erhöhte Dauerhaftigkeit zu erreichen. Bei geringer Dosierung kann Silikastaub (wie sehr feine Füller) einen positiven Einfluss auf die Verarbeitbarkeit haben, jedoch nehmen mit höherer Dosierung die Viskosität und die Fließgrenze zu, d.h. Silikastaub kann auch einen gegensätzlichen Einfluss haben und die Verarbeitbarkeit verschlechtern.

Die Auswahl und Beurteilung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung ist ein wichtiger Bestandteil des Mischungsentwurfes des Betons, wobei die Korngrößenverteilung eine einfache Aufteilung der Gesteinskörnung in Fraktionen ist, die jeweils eine Klasse an Partikelgrößen abbildet. Um das Risiko der Entmischungsneigung zu minimieren, sollte die Gesteinskörnung kontinuierlich abgestuft sein (Dreux and Festa, 1998).

Abbildung 10 stellt den typischen Bereich der Korngrößenverteilungen für Kontraktorbetone mit einem Größtkorn von 16 mm dar. Es wird empfohlen, dass die Sieblinie „B16“ als Ausganspunkt für den Mischungsentwurf verwendet wird. Ähnliche Verteilungen für andere Größtkorndurchmesser sind in DIN 1045-2 gegeben.

Abbildung 10: Korngrößenverteilung für ein Größtkorn von 16 mm, entnommen aus DIN 1045-2 zu EN 206-1.



Der Betonlieferant sollte bei der Festlegung einer geeigneten Korngrößenverteilung eine Vielzahl an Faktoren ausbalancieren:

- Kornform: (natürliches) Rundkorn unterstützt die Herstellung eines fließfähigen Betons besser als kantigeres, gebrochenes Korn.
  Hinweis: bei gleicher Kornverteilung und gleichem Volumen wird der Blockierwiderstand bei der Bewehrung für Betone mit gebrochenem Korn höher eingeschätzt, wodurch üblicherweise mehr (stabiler) Zementleim für Beton mit gebrochener Gesteinskörnung erforderlich ist.
- Korngröße: eine gröbere Korngrößenverteilung (d.h. ein höherer Anteil größerer Körner) kann die Verarbeitbarkeit verbessern, ist aber auch anfälliger für Entmischung.
- Mehlkorngehalt / Feinanteile: ein höherer Feinanteil führt zu einer kohäsiveren Mischung (mit einer höheren Fließgrenze)
  Hinweis: ein übermäßiger Feinanteil kann die Verarbeitbarkeit aufgrund des höheren Wasseranspruches beeinträchtigen und somit zu einer höheren Dosierung von Zusatzmitteln führen.

Während die günstigen Auswirkungen moderner Zusatzmittel bei der Herstellung moderner Betone bekannt sind, ist es ebenso wichtig, die möglichen negativen Auswirkungen der Zusatzmittel zu verstehen. Eine Reduktion des Wassergehaltes, unter Verwendung von Fließmittel, kann eine Erhöhung der Viskosität herbeiführen. Die reduzierte Verarbeitbarkeit zu kompensieren könnte mehr Zementleim erforderlich machen. Dadurch wird aber die Fließgrenze des Betons reduziert und die Entmischungsgefahr erhöht werden.

Neben der Zusatzmitteldosierung können die Wirkstoffe und deren Wirkmechanismus Nebeneffekte wie zum Beispiel ein klebriges Erscheinen (hohe Viskosität) oder eine Ansteifen hervorrufen. Einige Kombinationen aus Zementen und Zusatzmitteln können eine mangelhafte Robustheit des Frischbetons verursachen, die zu einer übermäßigen Entmischung führen können (Aitcin and Flatt, 2015).

Detaillierte Empfehlungen zum Mischungsentwurf von Beton sind außerhalb des Rahmens dieses Leitfadens. Der Schwerpunkt dieses Leitfadens liegt bei der Beurteilung der Leistung des Frischbetons unter Anwendung der in *Kapitel 5* gegeben Prüfmethoden mit empfohlenen Wertebereichen.

4.4 Mischungszusammensetzung und praktische Überlegungen

Die Grenzwerte für die Betonzusammensetzung sollten mit den Anforderungen aus der europäischen Norm EN 206:2013 und insbesondere mit *Anhang D* dieses Leitfadens, wo die Anforderungen der EN 1536 und der EN 1538 zusammengeführt sind, oder mit den lokalen und projektspezifischen Normen übereinstimmen.

Aufgrund neuer Entwicklungen oder konkreter Arbeitsbedingungen können Abweichungen von den Normen in Betracht gezogen werden, wie zum Beispiel ein teilweiser Ersatz von Zement durch Flugasche oder eine Unterschreitung des normativ festgelegten Mindestzementgehaltes. Drei Konzepte stehen für den Einsatz und die Anwendung von Typ-II-Zusatzstoffen zur Verfügung bzw. für die Anerkennung der gleichwertigen Leistungsfähigkeit des Betons (wie in *Anhang B* beschrieben). Diese sind:

1) Der k-Wert-Ansatz
2) Das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit.
3) Das Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen.

Nach der Eignungsprüfung im Labor ist es empfehlenswert vollmaßstäbliche Feldversuche unter realen Produktionsbedingungen durchzuführen, um die Leistung des Betons und die Eignung der geforderten Eigenschaften zu überprüfen und beurteilen. Im Projektzeitplan sollten geeignete Zeitfenster vorgesehen werden, um die erforderlichen Prüfungen durchzuführen.
Die Prüfung und Beurteilung dieses Betons sollte von qualifiziertem Personal ausgeführt bzw. durch qualifiziertes Personal unterstützt werden. Es sollte dabei sorgfältig geprüft werden, dass die bei der Herstellung der Probemischung vorhandenen Bedingungen den späteren Bedingungen beim Bau entsprechen. Falls sich die Bedingungen ändern (Herkunft der Gesteinskörnung und des Zementes, Typ oder Dosierung von Zusatzstoffen bzw. Zusatzmitteln, etc.), sind neue Untersuchungen an Probemischungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass die geforderten Eigenschaften und Leistung des Betons weiterhin erreicht werden (FHWA GEC10).

Die erforderlichen Zusatzmittel sollten mit Probemischungen festgelegt werden, bei denen die beim Bau zu erwartenden Bedingungen (Umgebungstemperatur, Lieferzeiten, Einbauverfahren, etc.) nachgebildet werden. Dabei sollte eine Betonprobe entnommen und auf Konsistenzhaltung geprüft werden. Hierfür sollten auch Werte der Verarbeitbarkeit gemessen werden, um den Verarbeitbarkeitsverlust über die Zeit grafisch darstellen zu können.

Es ist unabdingbar die Mischzeit zu kontrollieren, um sicherzustellen, dass keine unkontrollierten Effekte durch die Zusatzmittel entstehen. Labor- und Feldversuche können dazu beitragen, dass die optimale Zusatzmitteldosierung und Mischzeit verwendet wird und potentielle Risiken minimiert werden.

Auch die Temperatur beeinflusst die Rheologie. Bei wärmerem Wetter kann z.B. die Wirksamkeit von Fließmitteln reduziert werden, jedoch könnte eine höhere Dosierung die Stabilität des Betons gefährden, insbesondere es wieder kühler wird. Ohne Anpassung der Dosierung von verzögernden Zusatzmitteln wird eine Temperaturerhöhung von ca. 10 °C den Verlust an Setzmaß verdoppeln. Somit wird eine Setzmaßkurve, die im Labor bei 22 °C ermittelt wurde, für Betone irreführend sein, die auf der Baustelle bei höheren Temperaturen von 32 °C eingebaut werden (Tuthill, 1960).

Üblicherweise werden Sommer- und Wintermischungen für den Beton mit unterschiedlichen Zusatzmitteldosierungen und geringfügigen Anpassungen des Zementgehaltes und des w/z-Wertes verwendet.

Besondere Aufmerksamkeit sollte auf das Mischverfahren in der Betonmischanlage gelegt werden. Im Nassmischverfahren werden alle Ausgangsstoffe in einem zentralen Betonmischer in der Betonmischanlage gemischt und dann in einem Mischfahrzeug zur Belieferung übergeben. Im Trockenmischverfahren werden die trockenen, festen Ausgangsstoffe in ein Mischfahrzeug aufgegeben, im Anschluss Wasser hinzugegeben und der Mischvorgang findet innerhalb des Mischfahrzeugs statt.

Im Allgemeinen wird der im Nassmischverfahren hergestellte Beton dem im Trockenmischverfahren hergestellten Beton für Betone, an die hohe Ansprüche gestellt werden, vorgezogen. Es ist jedoch auch möglich solche Betone im Trockenmischverfahren herzustellen und zu liefern, jedoch ist es unabdingbar, dass die Mischzeit im Mischfahrzeug ausreichend ist, insbesondere in Zeiten hoher Nachfrage. Es wird empfohlen, detaillierte Chargenprotokolle mit Angabe der tatsächlichen Mischzeit und -menge je LKW-Ladung einzuholen.

Die Eignungsprüfung im Labor oder, wenn möglich, die großmaßstäblichen Mischversuche sollten daher eine Toleranz infolge Dosierungenauigkeiten berücksichtigen. Anwendbare Prüfmethoden zur Beschreibung der Rheologie, inklusive empfohlener Bereiche für die Konformitätskriterien, werden in *Abschnitt 5* behandelt.

Sollte der Betonhersteller die Möglichkeit haben müssen, kleinere Anpassungen an der Betonzusammensetzung vornehmen zu müssen, um die erforderlichen Eigenschaften zu erreichen, sollten solche Anpassungen im Voraus in ihrem Ausmaß einvernehmlich vereinbart werden. Ohne eine solche Vereinbarung sollte der Mischungsentwurf vom Betonhersteller und –lieferanten nicht geändert werden.

5 Festlegung und Prüfung von Beton und Qualitätskontrolle der Betonproduktion

5.1 Ein neuer Ansatz zur Festlegung von Frischbeton

Wie in *Abschnitt 3* beschrieben ist es wichtig Kontraktorbeton anhand seiner rheologischen Eigenschaften festzulegen. Diese Eigenschaften sollten in der Phase des Mischungsentwurfes durch substantielle Eignungsprüfungen entwickelt werden und geeignete Konformitäts- und Annahmeprüfungen sollen die Einhaltung dieser Eigenschaften während der gesamten Projektdauer sicherstellen.

Die derzeit gängige Praxis ist es die Druckfestigkeit, den Mindestzementgehalt, den maximalen w/z-Wert, und die Konsistenz (das Setz- oder Ausbreitmaß) festzulegen. Diese Parameter sind unzureichend, um die erforderlichen Frischbetoneigenschaften von Kontraktorbeton, insbesondere der Verarbeitbarkeit, der Konsistenzhaltung und der Stabilität vollständig zu beschreiben.

Zusätzliche Anforderungen an den Beton in Bezug auf einzelne Zielwerte, Prüfmethoden und Annahmekriterien sollten durch den Verfasser der Festlegung spezifiziert werden.

5.2 Prüfmethoden zur Charakterisierung des Frischbetons

Eine eingehende Überprüfung durch die Technische Universität München und die Missouri University of Science and Technology hat ergeben, dass die grundlegenden Eigenschaften zur Beschreibung der Betonverarbeitbarkeit die Fließgrenze und die Viskosität sind (Kraenkel und Gehlen 2018). Da zurzeit keine baustellentauglichen Prüfmethoden zur direkten Messung dieser Eigenschaften existieren, ist die Anwendung indirekter Messmethoden erforderlich. Mit dem Setzfließmaß und der Setzfließgeschwindigkeit, die in *Anhang A.1* beschrieben sind, können diese relevanten Eigenschaften indirekt gemessen werden, und als Indiz für die Stabilität kann der VSI-Test verwendet werden. *Abbildung 11* stellt die Korrelation zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß dar. *Abbildung 12* zeigt die grobe Korrelation zwischen Viskosität und Setzfließgeschwindigkeit.

Abbildung 11: Setzfließmaß in Abhängigkeit der Fließgrenze und der empfohlene Bereich für Kontraktorbeton (siehe *Anhang A.1*). Siehe auch *Abbildung 6*.

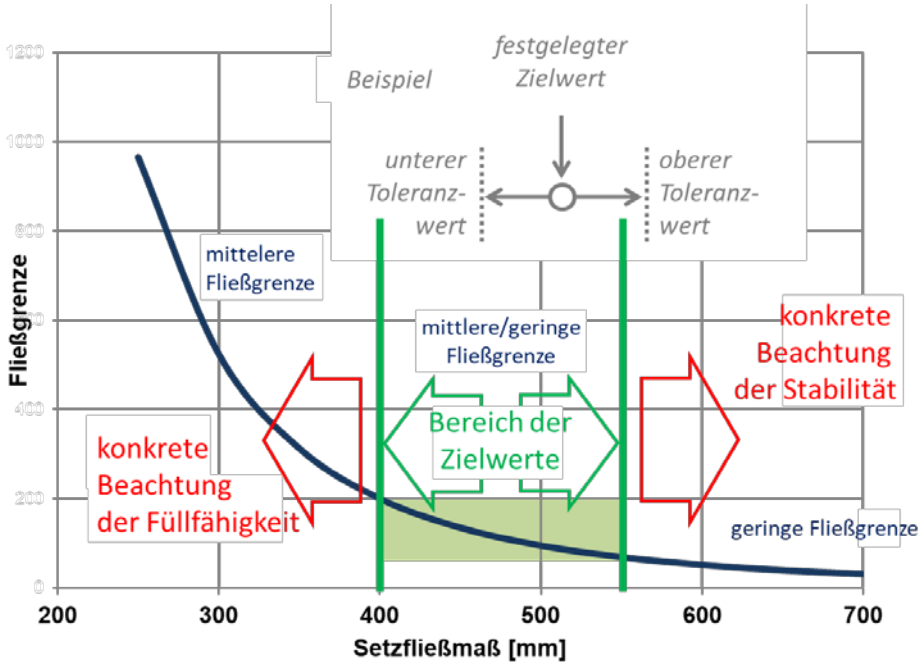
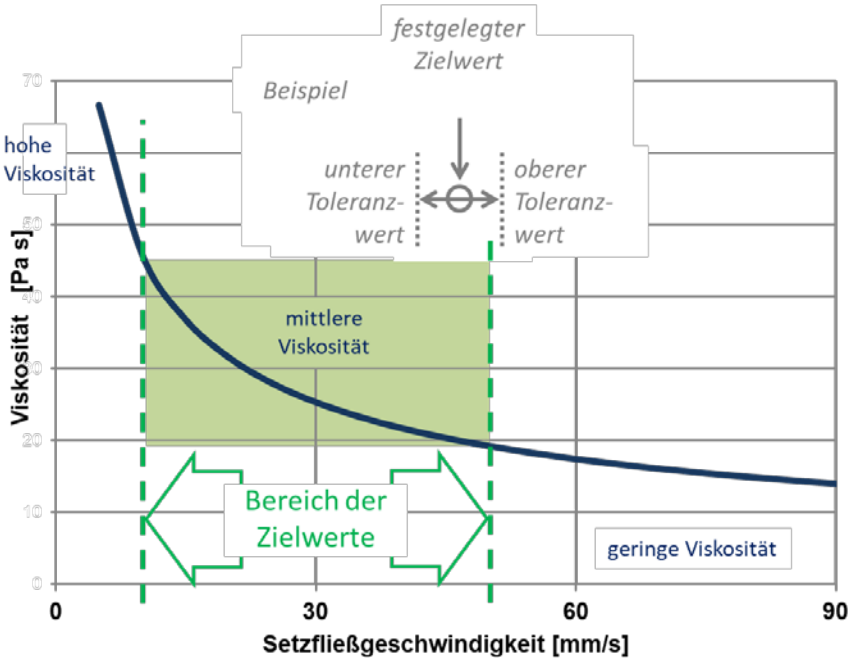


Abbildung 12: Setzfließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität und Darstellung des empfohlenen Bereiches mittlerer Viskosität für Kontraktorbeton (Prüfung siehe Anhang A.1.2)



Zusätzlich zum kombinierten Test des Setzmaßes, der Setzfließgeschwindigkeit und des Visual Stability Index (Anhang A.1) sind andere Prüfverfahren zur Charakterisierung des Frischbetons bezüglich dessen Verarbeitbarkeit, Konsistenzhaltung und Stabilität in Anhang A.2 bis A.10 gegeben, der Anwendungsbereich in Abschnitt 5.3.

Der Setzmaßversuch (Anhang A.2) und der Ausbreitmaßversuch (Anhang A.3) sind genormte Prüfmethoden zur Bestimmung der Konsistenz von Beton gemäß EN 12350-2 und EN 12350-5. Gemäß den Ergebnissen des durchgeführten F&E-Projekts bietet das Setzfließmaß aber eine bessere Korrelation mit der Fließgrenze für Kontraktorbeton. In diesem Leitfaden wird deshalb das Setzfließmaß als bevorzugten Parameter zur Abbildung der Fließgrenze eingeführt.

Der L-Kasten-Versuch kann zwar den Widerstand gegen Blockierneigung von Kontraktorbeton gut sichtbar machen. Dieser erscheint jedoch durch die obligatorische Begrenzung des Größtkorndurchmessers als ausreichend abgedeckt. Da aufgrund des singulären Fließwiderstandes der Stäbe im L-Kasten-Versuch dieses Prüfverfahren nicht direkt mit den rheologischen Eigenschaften des Kontraktorbetons korreliert werden kann, wird es nicht weiterempfohlen (Kraenkel und Gehlen 2018).

5.3 Eignungs-, Konformitäts- und Annahmeprüfung

Zweck der Eignungsprüfung ist es eine Betonrezeptur zu finden, welche die häufig gegensätzlichen Anforderungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften, also Verarbeitbarkeit, Stabilität, Konsistenzhaltung, Thixotropie, Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit ausbalanciert. Es ist wichtig anzuerkennen, dass die erfolgreiche Eignung eines Kontraktorbetons durch eine Reihe an Versuchen bestimmt wird und kein einzelner Versuch alle erforderlichen Eigenschaften adäquat beschreiben wird.

Die Konformitätsprüfung ist ein wesentlicher Bestandteil der Produktionskontrolle des Betonlieferanten. Die Bewertung der Konformität ist hier die systematische Untersuchung, inwieweit der Frischbeton die geforderten Eigenschaften erfüllt.

Während der Herstellung von Tiefgründungen bestätigen die Annahmeprüfungen vor Ort die Akzeptanz der jeweils gelieferten Charge und das Setzfließmaß und der Visual Stability Index sollte bei jeder Lieferung geprüft werden. Für die weniger kritische Setzfließgeschwindigkeit sollte eine Püfung je Woche ausreichend sein. Andere Prüfverfahren, die zum Nachweis der Konformität empfohlen werden, zum Beispiel der Stabilität, können im Bedarfsfall verwendet werden.

Tabelle 1 listet die geeigneten Prüfverfahren für Kontraktorbeton auf (siehe auch Anhang A).

Tabelle 1: Prüfverfahren und Werte für die Eignungsprüfung von Kontraktorbeton in der Planungsphase

Prüfverfahren		zur Bestimmung der		
Nr.		Verarbeitbarkeit	Thixotropie	Stabilität
A1.1	Setzfließmaß	✔	✔*	–
A1.2	Slump Flow Velocity	✔	-	–
A1.3	VSI	–	–	✔
A2	Setzmaß	✔	✔*	–
A3	Ausbreitmaß	✔	✔*	–
A4	Modified Cone Outflow	✔	-	–
A5	Manual Vane Shear	✔	✔*	–
A6	Konsistenzhaltung	✔	-	-
A7	statische Entmischung	-	-	✔
A8	Sieb Entmischung	-	-	✔
A9	Bluten	-	-	✔
A10	BAUER Filtration	-	-	✔

** Hinweis: Informationen zur Thixotropie können gemäß Anhang A.6 gewonnen werden.*

*** Hinweis: Diese Prüfverfahren entsprechen nicht streng den Europäischen oder US Normen. Es werden daher nicht alle Betonlieferanten mit den angegebenen Eigenschaften vertraut sein, wodurch eine konkrete Vereinbarung mit dem Betonlieferanten von Fall zu Fall erforderlich sein kann. Optionale Prüfmethoden sind in Anhang A gelistet und beschrieben.*

Tabelle 2 gibt empfohlene Prüfverfahren, Zielwertbereiche und Toleranzen wieder. Zudem werden die Relevanz jedes Prüfverfahrens für die Eignungs- und Konformitätsprüfung sowie die erforderliche Häufigkeit der Annahmeprüfungen für Kontraktorbetone dargestellt. Der Verfasser der Festlegung soll die erforderlichen Eigenschaften aus Tabelle 2 auswählen und festlegen, so dass der Betonlieferant diese in der Eignungsprüfung prüfen kann.

Die gewählten Zielwerte müssen durch den Verfasser der Festlegung nach einer ingenieurstechnischen Beurteilung (seitens des Tragwerksplaners und/oder der Baufirma) der konkreten Details der Tiefgründung festgelegt werden. Die wichtigsten Faktoren sind hierbei der lichte Abstand vertikaler und horizontaler Bewehrungsstäbe, das Bauteilvolumen, die geschätzte Betonierdauer und die Tiefe. Weitere Faktoren sind im Anhang F aufgelistet. Wenn die detaillierte Beurteilung eine Anforderung hoher Verarbeitbarkeit (z.B. Zielwert des Setzfließmaßes von 550 mm) ergibt, dann kann dies zusätzliche Prüfungen erfordern, um eine ausreichende Stabilität der Mischung sicherzustellen. Im Gegenzug, wenn eine geringe Verarbeitbarkeit als geeignet erachtet wird (z.B. Zielwert des Setzfließmaßes von 400 mm) kann dies zusätzliche Prüfungen zur Sicherstellung der Füllfähigkeit über die Zeit, d.h. der Konsistenzhaltung erfordern.

Tabelle 2: Empfohlene Prüfverfahren für Kontraktorbetone

Nr.	PRÜFVERFAHREN	Empfohlener BEREICH der ZIELWERTE	TOLERANZEN bzgl. festgelegtem Zielwert	RELEVANZ für EIGNUNG & ANNAHME	HÄUFIGKEIT * * der geforderten ANNAHME Prüfung
A1.1	Setzfließmaß	400 – 550 mm	± 50 mm	P	jede Lieferung
A1.2	Slump Flow Velocity	10 – 50 mm/s	± 5 mm/s	P	1x pro Woche
A1.3	VSI	0	-	P	jede Lieferung
A4	Modifizierter Trichterauslauf****	3 – 6 s	± 1 s	E	bei Bedarf
A6	Konsistenzhaltung	ist festzulegen	- 50mm	E/P*	bei Bedarf
A7	statische Entmischung	≤ 10%	+ 2%	E/P*	bei Bedarf
A9	Bluten	≤ 0,1 ml/min	+ 0,02 ml/min	E/P*	bei Bedarf
A10	BAUER Filtration****	≤ 22 ml***	+ 5 ml	E/P*	bei Bedarf

P = Pflicht; E = Empfohlen

** Hinweis: Basierend auf einer detaillierten ingenieurtechnischen Beurteilung.*

*** Hinweis: Die Prüfhäufigkeit kann angepasst werden, sobald die Zielwerte zuverlässig und durchgehend erreicht worden sind.*

**** Hinweis: Höhere Filtratwerte können, basierend auf vorangegangen Erfahrungen mit ähnlichen Mischungen, akzeptabel sein.*
***** Alternative Prüfverfahren verfügbar, vgl. Anhang A.4.2 und Anhang A.10.2*

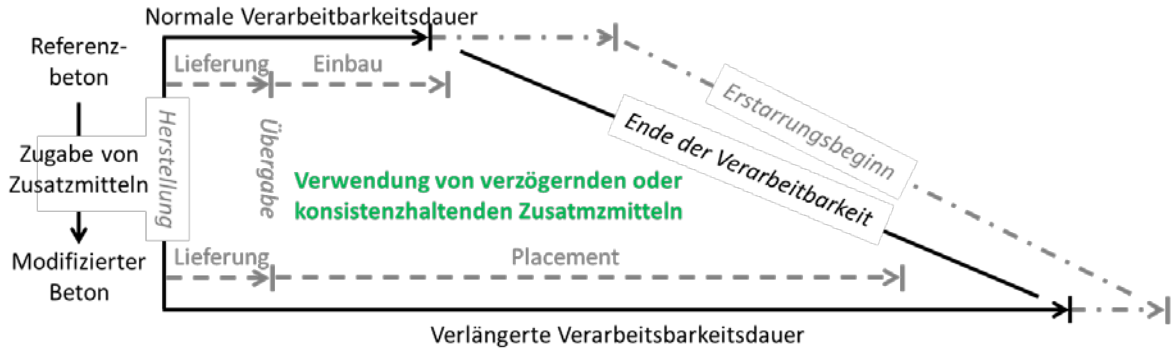
5.4 Kontrolle der Konsistenzhaltung

Es ist wichtig, dass der Verfasser der Festlegung (siehe *Abbildung 2*) eine realistische Beurteilung der Zeitspanne trifft, über die bestimmte Eigenschaften eingehalten werden sollen bzw. der Verlust an Verarbeitbarkeit begrenzt sein sollte, trifft. Dies gilt insbesondere für große Betonagen (z.B. > 200 m³), bei eingeschränkter Lieferkapazität oder, wenn die Anlieferung wegen enger Baustellenbedingungen schwierig ist. Die Beurteilung sollte Folgendes berücksichtigen:

- erforderliche Zeit zur Betonage eines Pfahls/Elementes
- Transportstrecke/-zeit vom Betonmischwerk zur Baustelle
- Kapazität des Betonmischwerkes und Kontrolle der Ausgangsstoffe
- Verfügbarkeit zugelassener Ersatzmischwerke
- Kapazität und Anzahl der Betonfahrmischer
- Qualität der Baustellenzufahrt
- Klimatische Bedingungen, insbesondere Temperatur
- tatsächlicher Verarbeitbarkeitsverlust über die Zeit, siehe *Tabellen 1 und 2* und *Anhang A.6*

Detaillierte Überlegungen zu den obigen Faktoren führen oft dazu, dass die Konsistenzhaltung (manchmal auch als Verarbeitbarkeitszeit bezeichnet) mittels verzögernden oder konsistenzhaltenden Zusatzmitteln verlängert werden muss, wie in *Abbildung 13* dargestellt.

Abbildung 13: Verlängerung der Verarbeitbarkeitszeit



Die empfohlene Konsistenzhaltung kann über die mindestens erforderliche Verarbeitbarkeit zum Ende des gesamten Betoneinbaus festgelegt werden. Für tiefere Elemente sollte, unter Berücksichtigung des Fließmusters und der Rückbaustufen des Kontraktorrohrs, eine detaillierte Beurteilung vorgenommen werden, ob die Mindestverarbeitbarkeit zum Ende der Betonage nicht erforderlich ist.

Hinweis: detaillierte Empfehlungen für solche Bedingungen können zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden. Diese sollten in zukünftigen Auflagen dieses Leitfadens behandelt werden, sobald umfangreiche numerische Studien solche Empfehlungen ausreichend beweisen.

Es sollte angemerkt werden, dass Normen regelmäßig überprüft und ggf. erneuert werden, um eine geeignete Prüfung von Frischbeton und zur Beurteilung der Konsistenzhaltung vorzugeben. Einen aktuellen Entwurf enthält *Anhang A*.

5.5 Qualitätskontrolle bei der Betonherstellung

Betonlieferanten sollten in Übereinstimmung mit den festgelegten Vertragsbedingungen arbeiten (in Europa mit EN 206 und zugehörigem nationalem Anhang). Der Betonlieferant sollte, sofern möglich, im Besitz eines gültigen Zertifikates über die Produktkonformität sein. In abgelegenen Gegenden kann es sich als schwierig erweisen einen Transportbetonlieferanten zu finden, der ein solches Zertifikat über die Produktkonformität nachweisen kann:

- Ein anerkanntes Qualitätsmanagementsystem
- Produktprüfung durch oder kalibriert an einem für diese Prüfung akkreditierten Labor
- Fremdüberwachung, mit Überprüfung der Gültigkeit der Konformitätserklärungen des Herstellers durch eine akkreditierte Prüf- bzw. Überwachungsstelle.

Hinweis 1: Die Konformitätskontrolle muss in Übereinstimmung mit den Anforderungen an die Konformitätskontrolle für Beton mit festgelegten Eigenschaften erfolgen, z.B. gemäß EN 206.

Hinweis 2: Festlegungen für die Beurteilung, Überwachung und Zertifizierung der Produktionskontrolle durch eine akkreditierte Stelle sollten denen einschlägiger Normen entsprechen, z.B. EN 206.

Die Herstellung spielt eine Schlüsselrolle hinsichtlich der gleichbleibenden Qualität der einzelnen Betonchargen und ist daher maßgeblich für das Verhalten des Kontraktorbetons. Es ist anerkannte Praxis, sich vor dem Bestellen des Betons sowohl mit dem Entwurf als auch mit den Herstellungs- und Kontrollprozessen des Herstellers vertraut zu machen. Der Betonlieferant sollte den Verfasser der Festlegung über den Zustand der Betonmischanlage zum Zeitpunkt der Ausschreibung und

unverzüglich, wenn sich zwischen dem Bestellzeitpunkt und das Belieferungsende eine Änderung ergibt, informieren.

In Regionen, in denen keine Betonlieferanten mit dem geforderten Produktkonformitätszertifikatsniveau verfügbar sind, ist es möglich einen Lieferanten mit einem geringeren Qualitätssicherungsniveau heranzuziehen. Die Verantwortung könnte dann aber auf den Kunden übergehen, die Qualität und Gleichmäßigkeit gelieferten Betons sicherzustellen. Als Mindestanforderung sollte ausreichend erfahrenes Personal die folgenden Punkte kontrollieren (oder beurteilen):

- Kalibrierung der Waagen, um korrekte Mischungsverhältnisse sicherzustellen.
- Der Feuchtegehalt (Wassergehalt) der Gesteinskörnung
  Hinweis: Kontraktorbeton enthält häufig einen höheren Anteil an feiner Gesteinskörnung als Normalbeton und daher kann ein angenommener Feuchtegehalt zu niedrig sein (Harrison, 2017)
- Kalibrierung der Durchflussmesser, falls diese für Wasserdosierung o.a. verwendet werden.
  Hinweis: Drehmomentmesser können für die mittlere Verarbeitbarkeitsspanne als zuverlässig betrachtet werden
- Methode zur Messung der Zusatzmitteldosierung
- Kalibrierung der Sensoren zur Messung des Wassergehalts der Gesteinskörnungen, sowohl von automatischen Sensoren, sofern damit etwa der Wassergehalt der feinen Gesteinskörnung gemessen wird, als auch von Handgeräten, mit denen der Wassergehalt der gelagerten Gesteinskörnungen gemessen werden.

Im Allgemeinen wird Folgendes als Stand der Technik für die Herstellung von Kontraktorbeton von gleichbleibender und ausreichender Qualität angesehen. Entsprechende Anforderungen sollten in der Projektvorgabe enthalten sein und Belege zum Nachweis der Konformität beinhalten:

- Der Feuchtegehalt der Gesteinskörnungen sollte regelmäßig in Abhängigkeit des Verbrauchs, den Wetter- und Lagerungsbedingungen, der Sensitivität der Mischung etc. gemessen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung stärker variieren wird als der der groben Gesteinskörnung. Es ist daher gängige Praxis den Feuchtegehalt auf Basis täglicher Beobachtung der groben Gesteinskörnung einzustellen. Der Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung variiert stärker und sollte daher mindestens für jede Lieferung gemessen werden. Moderne Betonmischer haben jedoch Sensoren, die den Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung am Punkt der Entladung in den Mischer kontinuierlich messen und den Wasseranspruch entsprechend anpassen. Für Großprojekte sollten solche Feuchtesensoren ausgeschrieben werden.

  Hinweis 1: Die Überprüfung des Feuchtegehalts nur des oberflächennahen Materials im Behälter der Gesteinskörnung, die nicht vor kurzem umgeschlagen wurde, ist möglicherweise nicht repräsentativ für die Mehrheit des Materials im Behälter.

  Hinweis 2: Die Oberflächenfeuchte und die Absorptionswerte für feine und grobe Gesteinskörnungen sollten regelmäßig durch Ofentrocknung repräsentativer Proben validiert werden.
  Hinweis 3: Die Temperatur und der Feuchtegehalt können durch Anforderung einer mindestens 24-stündigen Konditionierung der Gesteinskörnung vor dem Mischen weitgehend konstant gehalten werden.

- Die Kontrolle des tatsächlichen Wassergehaltes von Frischbeton sollte regelmäßig erfolgen.

  Hinweis: Beton wird häufig unter Verwendung automatischer Kontrolleinrichtungen, die das Volumen der zugegebenen Komponenten anhand des Drehmoments des Betonmischers

ausbalancieren, hergestellt. Für Kontraktorbeton mit einer hohen Verarbeitbarkeit können diese Messungen nicht präzise genug sein, weshalb eine Messung des tatsächlichen Wassergehaltes zu bevorzugen ist.

- Das Zugabewasser, inklusive rezykliertes Wasser, sollte wöchentlich hinsichtlich Feinanteilgehalt und chemischer Zusammensetzung kontrolliert werden, um die Übereinstimmung mit den relevanten Normen sicherzustellen, z. B. ASTM C1602 (2012) oder EN 1008.

  Hinweis 1: Die Variierung von rezykliertem Wasser kann nachteilige Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit haben und daher zusätzliche Zusatzmittel erfordern, um die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erreichen. Die Konsistenzhaltung sollte erneut überprüft werden, wenn rezykliertes Wasser verwendet wird.

  Anmerkung 2: Einige Auftragnehmer sind aufgrund deren Erfahrung einer größeren Streuung der Frischbetoneigenschaften zurückhaltend die Verwendung von rezykliertem Wasser zu akzeptieren. Diese Streuung ist wahrscheinlich auf unterschiedliche Feinanteilgehalte und/oder unterschiedliche enthaltene Fließmittelreste im rezykliertem Wasser zurückzuführen.

- Die Korngrößenverteilung feiner und grober Gesteinskörnungen sollte anhand repräsentativer Proben wöchentlich oder bei jedem Wechsel der Bezugsquelle geprüft werden.
- Der Betonmischer sollte mindestens einmal pro Tag gründlich gereinigt werden.
- Elektronische Kopien der Chargenprotokolle sollten für jeden Betonfahrmischer direkt ausgedruckt werden.

  Hinweis: alle Informationen, die für den Anwender erforderlich sind, sind auf dem Lieferschein enthalten. Da für ein Produktkonformitätszertifikat eine Anforderung bezüglich des Lieferscheins existiert, wird die akkreditierte Stelle die Lieferscheine stichprobenartig routinemäßig überprüfen und mit den festgelegten Anforderungen abgleichen (siehe Harrison, 2017 bezüglich der Interpretation von Chargenprotokollen).

- Die Fahrmischer sollten vor dem Befüllen sauber und frei von Wasser oder Betonresten sein.

  Anmerkung: Es liegt in der Verantwortung des Verfassers der Festlegung, die Verwendung von rezykliertem Material zu erlauben oder zu verbieten. Der Betonlieferant könnte verpflichtet sein, einem System zur Abfallminimierung zuzustimmen. Die Verwendung und Kontrolle von rezykliertem Wasser, von rückgeführtem Staub aus der Betonmischanlage oder wiedergewonnene Gesteinskörnung sollte aber identifiziert und gemessen werden, um deren Gehalt und Einfluss auf den Beton zu erfassen.

6 Ausführung

6.1 Allgemeines

Dieses Kapitel betrachtet die Methoden und die Verfahrenstechnik, die für das Betonieren von Tiefgründungen im Kontraktorverfahren zum Einsatz kommen (Bohrpfähle, Schlitzwände und Schlitzwandelemente).

Europäische, amerikanische und weitere internationale Normen und Richtlinien weichen voneinander ab. Dieser Leitfaden gibt daher Empfehlungen zu in der Praxis bewährten Verfahren.

Dieser Abschnitt behandelt nicht das Betonieren im Trockenen, bei dem Beton üblicherweise über eine gewisse Höhe frei fällt. Gemäß der europäischen Norm EN 1536:2010 und ICE SPERW (2017) ist das Betonieren im Trockenen zulässig, wenn durch eine Überprüfung unmittelbar vor dem Betonieren sichergestellt wird, dass auf der Bohrlochsohle kein Wasser steht. Die U.S. Department of Transportation FHWA GEC10, 2010 definiert als „trocken, wenn weniger als 75 mm Wasser auf der Bohrlochsohle steht oder der Wasserspiegel um nicht mehr als 25 mm in 5 Minuten ansteigt“. Ist der Wasserzutritt größer, wird empfohlen, die Bohrung bzw. den Schlitz mit Wasser aus einer externen Quelle zu fluten, um dem Zufluss mit einer größeren Druckhöhe entgegen zu wirken, und anschließend im Kontraktorverfahren zu betonieren. Das Betonieren eines Elements mit übermäßigem Wasserzutritt beinhaltet das Risiko, dass sich das zutretende Wasser mit dem Frischbeton mischt.

6.2 Vor dem Betonieren

Es ist unabdingbar, dass die Bohrlochsohle ausreichend frei von Bohrklein ist, um zu verhindern, dass dieses Material zu Beginn des Einbringens des Betons mit dem Kontraktorrohr aufgewirbelt wird und sich dann an der Grenzschicht ansammeln kann. Es ist schwierig, das gesamte Bohrklein von der Bohrlochsohle zu entfernen. Geringe Mengen losen Materials sind üblicherweise hinnehmbar.

Bei hohen Ansprüchen an die Sauberkeit der Aushubsohle, z. B. bei lastabtragenden Elementen, die hauptsächlich auf Spitzendruck bemessen sind, ist es wichtig, dass die Menge an Bohrklein auf der Aushubsohle möglichst geringgehalten wird. Die Vorteile, die erwachsen aus der zusätzlichen Zeit, die man sich zur Reinigung der Aushubsohle nimmt, sollten den negativen Auswirkungen gegenübergestellt werden, die dies hervorrufen könnte (z.B. eine erhöhte Filterkuchenbildung).

Angemessene Kriterien für die Sauberkeit der Aushubsohle sollten während der Projektplanung besprochen und vereinbart sowie auf der Baustelle entsprechend geprüft werden. Es gibt eine Reihe von Verfahren zur Überprüfung der Sauberkeit der Aushubsohle, einige Beispiele finden sich in FHWA GEC10 und ICE SPERW (2017).

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Geometrie des Aushubgerätes die Form der Aushubsohle vorgibt. Mit Greifern und Fräsen wird bei jedem Element ein unebenes, gekrümmtes Profil der Bohrlochsohle entstehen. In solchen Fällen ist es wichtig, dass die Stelle der Prüfung der Sauberkeit der Aushubsohle sorgfältig ausgewählt und aufgezeichnet wird. *Abbildung 14* zeigt die besondere Situation des Aushubs von hartem Material mit einer Schlitzwandfräse, bei der die Sohle nur die Form der Fräse wiederspiegeln kann, inklusive der Überlappungsbereiche in großen Elementen mit einem Mittelstich.

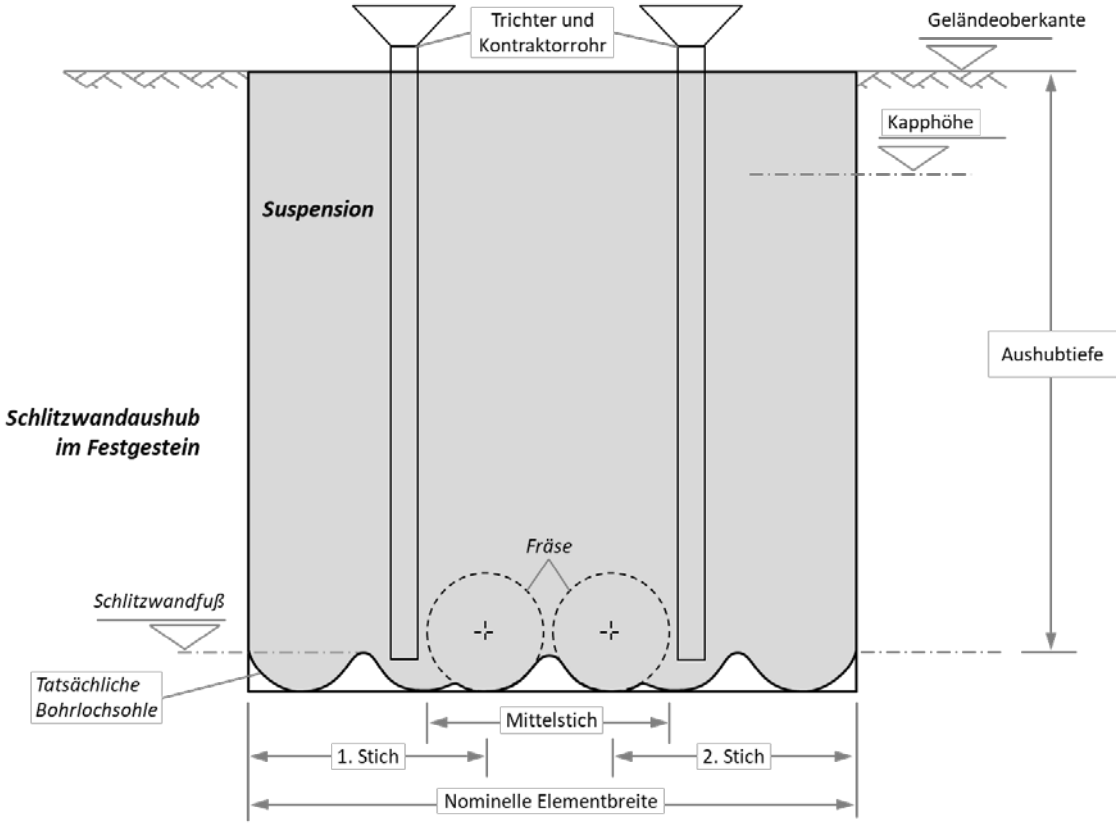
Bohrpfahlsohlen werden mit einem Kastenbohrer mit Räumleiste, einer Unterwasserpumpe, dem Lufthebeverfahren oder anderen bewährten Verfahren gereinigt. Schlitzwandsohlen werden üblicherweise mit dem Aushubgerät oder anderen bewährten Verfahren gereinigt.
Der EFFC/DFI Leitfaden für Stützflüssigkeiten diskutiert Möglichkeiten und Grenzen der Steuerung der Filterkuchendicke durch die Einstellung der Eigenschaften der Stützflüssigkeit.

Die Stützflüssigkeit sollte den aus dem Leitfaden für Stützflüssigkeiten geforderten Eigenschaften genügen, bevor der Bewehrungskorb eingeführt und der Beton eingebaut wird.

Bevor der Bewehrungskorb eingeführt wird (und vor Betonagebeginn) sollte sichergestellt sein, dass die tatsächlichen Bedingungen den Entwurfsanforderungen entsprechen, z.B. Aushubtiefe, nominelle Betondeckung (Abstandshalter) und Korbausbildung. Abstandshalter sollten die korrekte Lage des Bewehrungskorbes in der Bohrung sicherstellen und sollten in Abhängigkeit der Baustellengegebenheiten eingeplant werden.

Wird ein Schlitzwandelement in mehreren Stichen hergestellt, sollten deren Sohltiefen nicht mehr als 0,5 m voneinander abweichen, außer in jenen Fällen, in denen derartige Schlitzwandelemente z.B. im geneigten Festgestein eingebunden werden. Ist ein Schlitzwandelement abgestuft, ist dies beim Betonieren zu berücksichtigen.

Abbildung 14: Grabkurve je nach Geometrie des Aushubgerätes (Beispiel Schlitzwandfräse)



Der Zeitraum zwischen dem abschließenden Reinigen nach dem Aushub und vor dem Betonieren des Elements sollte so kurz wie möglich sein. Sind Bauteile wie Abschalelemente oder Bewehrungskörbe einzubauen, sollte die Reinigung vor deren Einbau durchgeführt werden. Das Reinigungsverfahren sowie der zeitliche Ablauf sollten an den ersten Elementen festgelegt werden. Bei Verzögerungen sollte die Qualität der Stützflüssigkeit erneut überprüft werden und, falls erforderlich, eine zusätzliche Regenerierung durchgeführt werden.

Bohrklein und Feststoffe, die sich aus der Stützflüssigkeit absetzen, werden üblicherweise von der ansteigenden Betonoberfläche nach oben getragen. Dies ist im EFFC/DFI Leitfaden für Stützflüssigkeiten detaillierter beschrieben. Die Betonierhöhe ist deshalb über die planmäßige Oberkante zu legen, um ein späteres Entfernen des verunreinigten Betons zu ermöglichen und gesunden Beton auf Kapphöhe zu gewährleisten.

6.3 Kontraktorrohr und Trichter

Schüttrohre sollten einen minimalen Innendurchmesser von 150 mm oder dem Sechsfachen des Größtkorns aufweisen, wobei der größere Wert maßgebend ist (EN 1536). Häufig wird ein Durchmesser von 250 mm verwendet. Pumprohre dürfen einen kleineren Durchmesser als 150 mm aufweisen.

Kontraktorrohre sollten aus Stahl gefertigt sein, da Aluminium mit Beton reagiert.

Die Verbindungen der Rohrschüsse sollten vollständig wasserdicht sein. Übliche Rohrschüsse sind 1 m bis 5 m lang. Längere Rohrschüsse werden im Allgemeinen bevorzugt, da sie weniger Rohrverbindungen haben, jedoch muss die Abfolge unterschiedlicher Längen die gegebenen Bedingungen berücksichtigen (z. B. Aushubtiefe, Höhe des Trichters, Eintauchtiefe beim Ausbau des ersten Rohrschusses, letzte Betonierphase bei geringem hydrostatischen Differenzdruck). Im Allgemeinen sollten bei jedem Ausbau alle Rohrverbindungen gelöst und die Rohrschüsse in einem Gestell gelagert werden, um eine ordentliche Reinigung zu ermöglichen. In einigen Fällen wurde das Versagen von Rohrverbindungen bei der Nutzung bereits festgestellt, weshalb eine Sichtprüfung nachdrücklich empfohlen wird.

- Kontraktorrohre ohne Rohrverbindungen dürfen bei kurzen Elementen verwendet werden, wenn die Handhabung des Kontraktorrohres es ermöglicht.
- Der Trichter sollte so groß wie möglich sein. Bei der Beschickung ist ein kontinuierlicher Betonfluss zum Rohr während der anfänglichen Einbettung des Kontraktorrohrs sicherzustellen.
- Die Rohre sollten glatt, sauber und gerade sein, um den Reibungswiderstand für den Betonfluss zu minimieren.

6.4 Abstand der Kontraktorrohre

Pfähle sind meist kreisrund und ein einzelnes, mittig eingebrachtes Kontraktorrohr genügt üblicherweise. Für Schlitzwände legen die Regelwerke unterschiedliche Grenzwerte für die horizontale Fließstrecke von 1,8 m bis 2,5 m, höchstens 3 m fest (ICE SPERW, 2017, EN 1538, Z17). Es wird empfohlen, die Fließstrecke auf 2 m zu begrenzen. Längere Strecken bis zu 3 m sind hinnehmbar, wenn die Verarbeitbarkeit des Betons als ausreichend nachgewiesen ist und gleichzeitig der Bewehrungsabstand und die Betondeckung über den Mindestwerten liegen. Versuche im Originalmaßstab oder numerische Untersuchungen (insbesondere in Vergleichsstudien) können bei der Auffindung zulässiger Werte behilflich sein, siehe *Kapitel 7* und *Kapitel 9.*

Kontraktorrohre sollten im Grundriss möglichst symmetrisch verteilt werden, um ein ungleichmäßiges Ansteigen des Betons im Element zu vermeiden, z.B. mittig bei einem Kontraktorrohr und bei zwei Kontraktorrohren etwa in den äußeren Viertelpunkten der Elementlänge.

6.5 Beginn des Betonierens

Der Betonierbeginn ist eine der kritischsten Schritte beim Betonieren, da die erste Betoncharge im Rohr von der (Stütz-)Flüssigkeit getrennt werden muss.

Sowohl der „nasse“ als auch der „trockene“ Betonierbeginn werden in unterschiedlichen Normen, Richtlinien und Beiträgen in Fachzeitschriften beschrieben (z.B. FHWA GEC10).

Erfolgt der Betonierbeginn „trocken“ (häufig mit Betonieren im Trockenen verwechselt), ist das Ende des Kontraktorrohrs geschlossen und der Beton tritt erst mit der Stützflüssigkeit in Kontakt, wenn der Beton aus dem Kontraktorrohr hinausfließt. Eine Stahl- oder Sperrholzplatte mit einem Dichtring wird am unteren Ende des Kontraktorrohres angebracht, wodurch beim Absenken des Kontraktorrohres zur

Bohrlochsohle kein Wasser in das Rohr hineinfließen kann. Der Beton wird direkt in das trockene Kontraktorrohr eingefüllt und das Rohr wird 0,1 m bis 0,2 m gezogen, damit der Beton in den Aushub fließt. Bei tieferen Betonagen kann es schwierig sein, zu verhindern, dass Flüssigkeit durch die Rohrverbindungen in das Kontraktorrohr eintritt und/oder dass das Kontraktorrohr aufschwimmt.

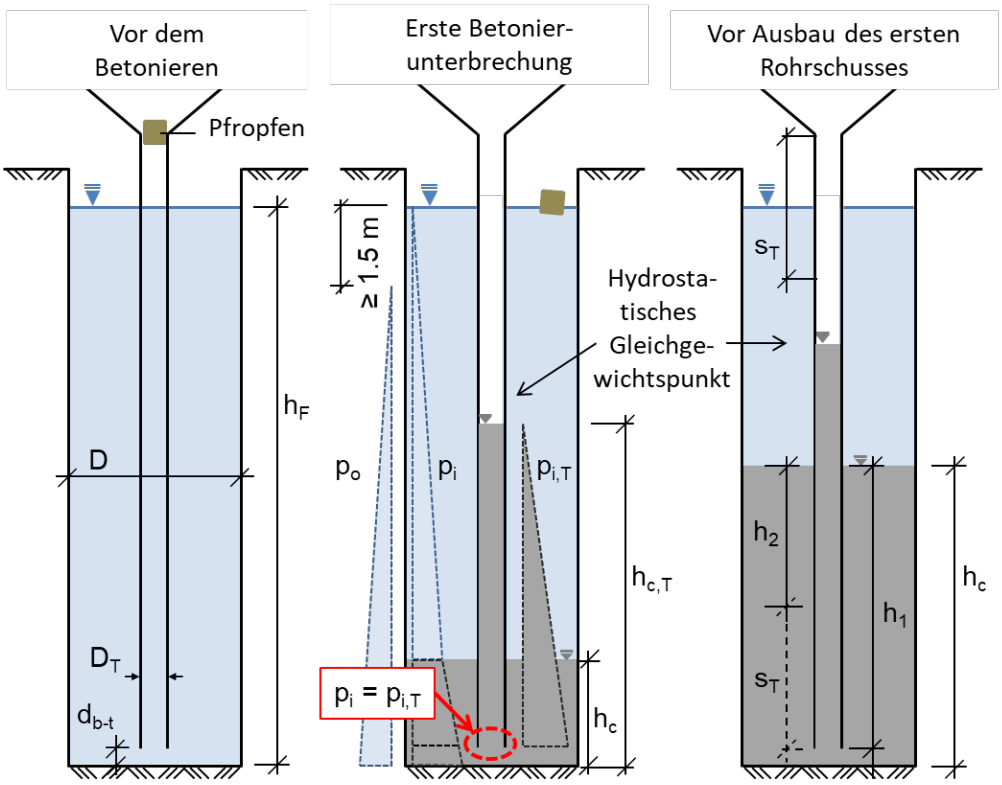
Erfolgt der Betonierbeginn „nass“, muss ein Pfropfen verwendet werden, da die Stützflüssigkeit im Kontraktorrohr ansteht. Beispiele für solche „Pfropfen“ umfassen Vermiculitgranulate (ggf. in einem Sack), aufblasbare Gummibälle, Schwämme und Schaumstoffbälle und -zylinder. Manchmal wird zusätzlich am Auslauf des Trichters eine Stahlplatte angebracht, die nach dem Füllen des Trichters mit Kranhilfe gezogen wird. Der Trennstopfen soll verhindern, dass sich die erste Betoncharge mit der Stützflüssigkeit vermischt, was zu einer Entmischung im Kontraktorrohr führen würde. Um das Betonieren zu beginnen, sollte das Kontraktorrohr zur Bohrlochsohle herabgelassen und dann geringfügig angehoben werden (höchstens um den Rohrdurchmesser), um das Austreten des Trennstopfens und das Ausfließen des Betons aus dem Kontraktorrohr am Rohrende zu ermöglichen.

ICE SPERW (2017) gibt an, dass ein gleitender Stopfen aus Vermiculit die doppelte Länge des Kontraktorrohrdurchmessers haben sollte und dass das Kontraktorrohr um nicht mehr als 0,2 m von der Aushubsohle gezogen werden sollte. Aus praktischen Gründen ist der „nasse“ Betonierbeginn die bevorzugte Methode.

Abbildung 15 zeigt die Druckverhältnisse vor den und während der Betonierphasen und verdeutlicht, dass vor dem Abschlagen des ersten Rohrschusses das Kontraktorrohr ausreichend tief eingebettet sein muss. Aufgrund dynamischer Effekte des Betonflusses kann die tatsächliche Betonhöhe im Kontraktorrohr, insbesondere bei der Unterbrechung nach der ersten Betonage, jedoch tiefer liegen als der in *Abbildung 15* dargestellte hydrostatische Gleichgewichtspunkt.

Die erforderliche Betonhöhe sollte für jede Baustelle ermittelt werden, aber in den meisten Fällen sind mindestens 5 m (6 m gemäß EN 1536) vor dem Ausbau des ersten Rohrschusses erforderlich. Es ist unerlässlich, dass eine zum Ausfüllen der Mindesthöhe ausreichende Betonmenge auf der Baustelle bereitsteht, bevor mit dem Betonieren begonnen wird.

Abbildung 15: Phasen des Betonierens im Kontraktorverfahren



Mit:

h_F	Niveau der Stützflüssigkeit in der Bohrung
D_T	Durchmesser des Kontraktorrohres
D	Abmessung (Durchmesser oder Breite) der Bohrung
d_{b-t}	Abstand von der Bohrlochsohle zum Auslass des Kontraktorrohrs
h_c	Betonhöhe in der Bohrung
$h_{c,T}$	Betonhöhe im Kontraktorrohr (= hydrostatischer Gleichgewichtspunkt)
h_1/h_2	Eintauchtiefe des Kontraktorrohres vor (1) / nach (2) dem Ausbau des ersten Rohrschusses
s_T	Länge des ausgebauten ersten Rohrschusses, mit: $h_2 \geq 3$ m
p_o/p_i	Hydrostatischer Druck außerhalb (o) / innerhalb (i) der Bohrung
$p_{i,T}$	Hydrostatischer Druck innerhalb des Kontraktorrohres

6.6 Eintauchtiefe des Kontraktorrohrs

Das Kontraktorrohr muss eine minimale Eintauchtiefe in den bereits eingebrachten Beton einhalten. Europäische Ausführungsnormen (EN 1536, EN 1538) fordern eine Eintauchtiefe von mindestens 1,5 m bis 3 m, wobei die höheren Werte für größere Elemente gelten. Im Allgemeinen gelten 3 m als praktikabler Wert.

Wird während des Betonierens eine temporäre Verrohrung verwendet, muss beim Ausbau von Rohrschüssen berücksichtigt werden, dass die Mindesteintauchtiefe des Kontraktorrohres erhalten

bleibt. Das Ziehen der temporären Verrohrung führt zu einem Abfall der Betonoberkante, da der Beton den durch die Verrohrung entstandenen Ringraum ausfüllt. Vor dem Ausbau eines Rohrschusses der temporären Verrohrung sollte die Eintauchtiefe des Kontraktorrohres so sein, dass die Mindesteintauchtiefe auch bei sinkendender Betonoberkante beim Ziehen der Verrohrung eingehalten wird.

Werden zwei oder mehr Kontraktorrohre verwendet (siehe *Abschnitt 6.4*), müssen die Ausflussöffnungen auf gleicher Höhe gehalten werden (ausgenommen bei abgetreppter Sohle, die anfängliche Sondermaßnahmen erfordert).

Damit der Beton zu fließen beginnt, muss die Gewichtskraft des Betons im Kontraktorrohr folgendes überwinden:

- den Widerstand außerhalb der unteren Öffnung des Kontraktorrohres (hydrostatischer Flüssigkeitsdruck)
- den Widerstand des bereits eingebrachten Betons
- die Reibung zwischen Beton und innerer Oberfläche des Kontraktorrohres.

Einige Autoren bezeichnen als hydrostatischen Gleichgewichtspunkt jenen Punkt, an dem die Schwerkraft innerhalb des Kontraktorrohres mit den Fließwiderständen im Gleichgewicht ist (siehe *Abbildung 15*). Jede weitere Betonzugabe über das hydrostatische Gleichgewicht hinaus führt zum Fließen des Betons aus dem Kontraktorrohr, welches mit steigender Betonierrate schneller wird.

Es gibt triftige technische Gründe, ein übermäßiges Eintauchen des Kontraktorrohrs zu vermeiden. Höhere Eintauchtiefen führen zu geringeren Druckhöhen, geringerer eingebrachter Energie und langsamerem Fließen des Betons. Eine Eintauchtiefe zwischen mindestens 3 m und höchstens 8 m wird empfohlen. Am Ende des Betonierens, d.h. nahe der Arbeitsebene, darf die Eintauchtiefe des Kontraktorrohres auf 2 m reduziert werden.

Für Bohrpfähle mit einem kleinen Durchmesser kann es notwendig sein, die maximale Eintauchtiefe zu erhöhen um zu vermeiden, dass ein Rohrschuss getrennt werden muss, bevor die komplette Charge eines Betonfahrmischers entladen wurde.

Die Betontiefe muss nach dem vollständigen Betonieren einer Charge an jedem Kontraktorrohr gemessen werden, häufig geschieht dies mittels eines beschwerten Bandmaßes. Wenn zwei (oder mehr) Kontraktorrohre in einem Schlitzwandelement verwendet werden, ist es unerlässlich, die Differenz der Betonhöhen zu minimieren und gleichzeitig über alle Kontraktorrohre zu entladen.

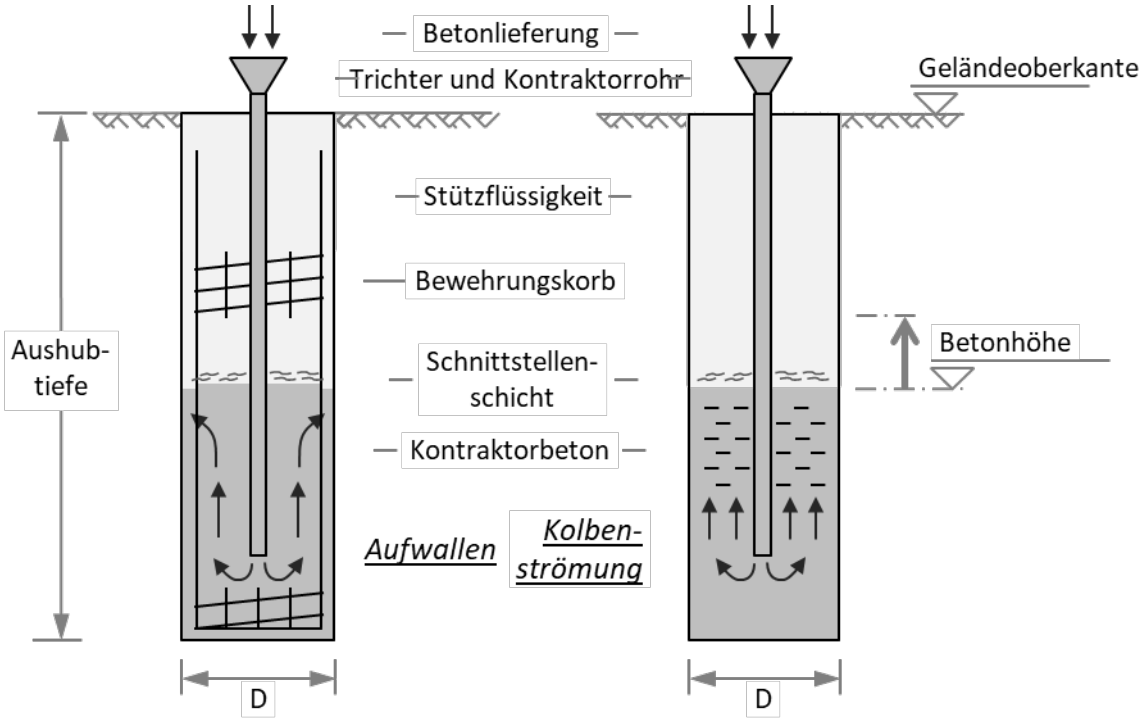
Der Beton sollte frei und ohne Stopfbewegung (rasches wiederholtes Heben und Senken des Kontraktorrohres) aus dem Kontraktorrohr fließen. Ist Stopfen für das Aufrechterhalten des Ausfließens des Betons erforderlich, ist dies in der Regel ein Hinweis auf eine nachlassende Verarbeitbarkeit. Dies kann das Strömungsbild beeinflussen und zu einem Vermischen mit Stützflüssigkeit und Bohrschlamm oberhalb des Betons führen, was zu Einschlüssen im Beton führt.

Ein geeignetes Verfahren für das Wiedereintauchen des Kontraktorrohres nach einem ungeplanten Herausziehen aus dem Beton, oder eine Unterbrechung der Betonlieferung, sollte bei der Angebotseinreichung dargestellt werden und/oder vor Beginn der Arbeiten vereinbart werden (siehe auch EN 1536, Satz 8.4.8)

6.7 Fließmechanismen des Betons

Die Ergebnisse aus Feldversuchen (Böhle und Pulsfort, 2014), und numerische Simulationen (siehe *Kapitel 9*) haben bestätigt, dass zwei grundlegende Typen des Fließens existieren: „Aufwallen“ und „Kolbenströmung“. Diese sind schematisch in *Abbildung 16* dargestellt.

Abbildung 16: Schema des Aufwallens und der Kolbenströmung



Basierend auf einer begrenzten Anzahl an Daten aus Feldversuchen sowie numerischen Simulationen wird angenommen, dass das Aufwallen der am häufigsten vorkommende Fließmechanismus beim Betonieren von Tiefgründungen ist. Nach Verlassen der Ausflussöffnung und einer Aufwärtsdrehung wird angenommen, dass der Frischbeton eine laminare Strömung über eine charakteristische Länge in einem beschränkten, mittigen Bereich des Aushubs bildet. Der Beton folgt hierbei den Pfad des geringsten Fließwiderstandes (entlang des Kontraktorrohrs) um sich dann oben auf dem Beton nach außen auszubreiten. Der ältere Beton wird hierbei auf- und auswärts verdrängt und dann im Umfang des Aushubs, wo ein relativ hoher Fließwiderstand herrscht, verbraucht. Folglich tritt ein Aufwallen in tragenden Tiefgründungen häufig dann ein, wenn der Bewehrungskorb eine wesentliche Behinderung des vertikalen Fließens darstellt. Des Weiteren beeinträchtigt auch ein rauer Bodenanschnitt den Betonfluss und trägt zum Aufwallen bei.

Eine Kolbenströmung weist einen Betonpfropfen an der Oberkante der Betonsäule innerhalb der Bohrung (oder innerhalb des Bewehrungskorbes) und oberhalb der Ausflussöffnung des Kontraktorrohrs auf. Dieser Stopfen wird durch einen von unten wirkenden Flüssigkeitsdruck aufgrund des „Pumpens“ von frischem Kontraktorbeton angehoben, wodurch der darüberliegende ältere Beton nach oben verdrängt wird. Es wird angenommen, dass der frische Beton sich nicht mit dem Pfropfen vermischt. Ein extremer Fall der Kolbenströmung wäre gegeben, wenn der Beton im Pfropfen nicht geschert wird, d.h. dass er sich innerlich im Ruhezustand befindet und für thixotrope Effekte anfällig ist. Kolbenströmung gilt als wahrscheinlicher in den Fällen, wo eine sehr geringe Reibung außerhalb herrscht (d.h. kein Bewehrungskorb und eine glatte Bohrlochberandung) oder für den inneren Bereich eines breiten Aushubs, welche im letzteren Fall zu einem Aufwallen kombiniert mit Kolbenströmung führen würde.

Es gibt mehrere voneinander abhängige Faktoren, welche den tatsächlich eintretenden Strömungstyp (oder eine Kombination der Typen) bestimmen. Die Strömung innerhalb eines einzelnen Tiefgründungselements kann auch während einer Betonage variieren, d.h. aufgrund zeitabhängiger Betonrheologie, einer lokalen Bewehrungskonzentration oder einer Änderung der einwirkenden hydrostatischen Bedingungen. Um diese komplexen Wechselwirkungen besser zu verstehen und die sensibelsten Parameter zu ermitteln, kann die numerische Modellierung verwendet werden (siehe *Kapitel 9*).

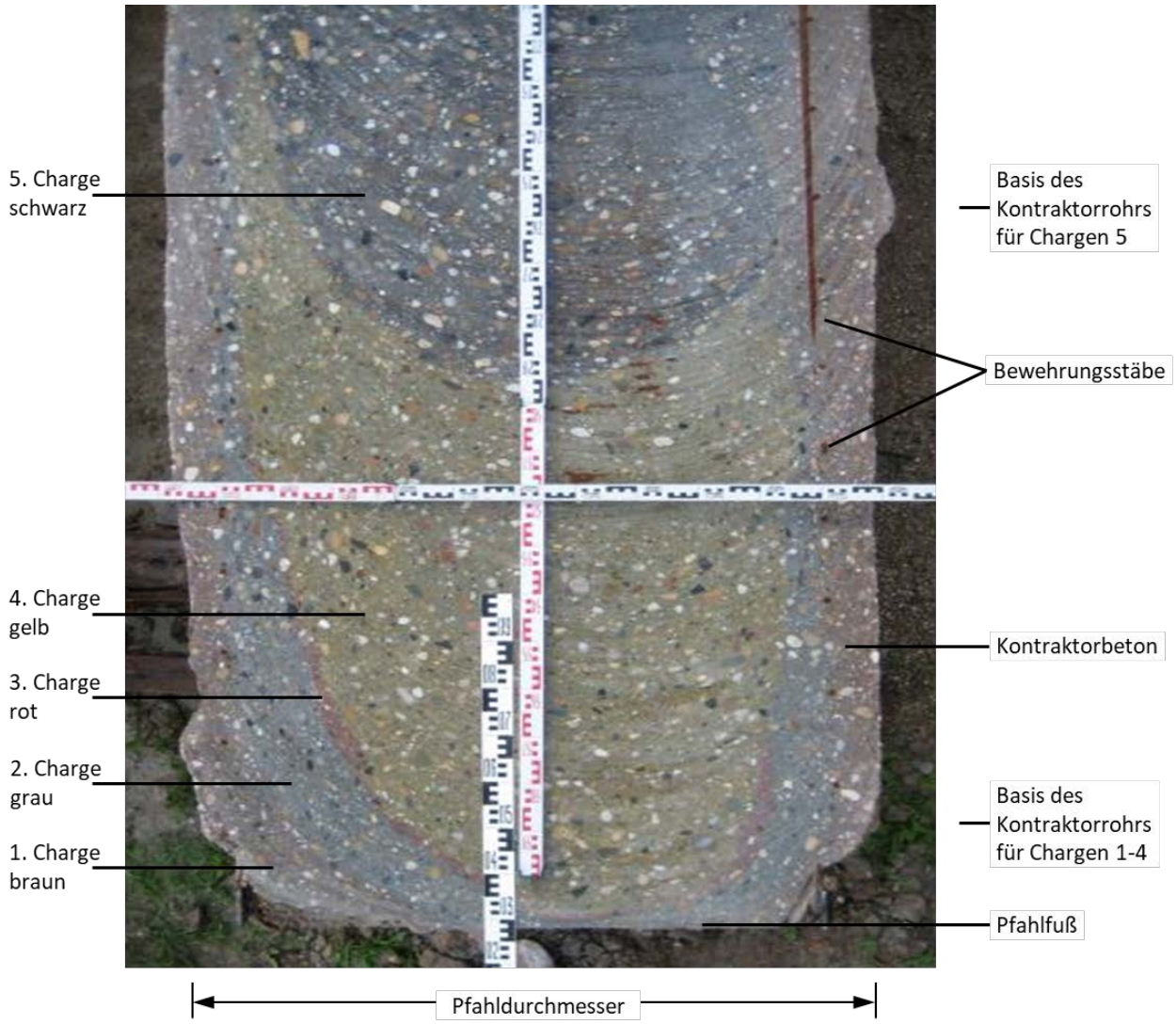
Die Fließmuster von Beton sind gelegentlich auf Baustellen untersucht worden, werden jedoch bisher noch nicht vollständig überblickt. Derzeit laufende Forschungsprojekte modellieren das Fließen von Beton aus dem Kontraktorrohr unter Einschluss der Grenzschicht numerisch mittels Software für Fluiddynamik und durch Simulationen (Böhle, Pulsfort, 2014).

Abbildung 17 zeigt einen Längsschnitt durch einen Bohrpfahl, der unter Verwendung von unterschiedlich eingefärbten Betonchargen hergestellt wurde, um das Fließmuster unter gegebenen Bedingungen zu untersuchen. Das sichtbare Fließmuster zeigt zuerst eingebrachten Beton im äußeren Bereich (insbesondere im Deckungsbereich) und später eingebrachten Beton im mittleren Bereich. Die gelb und schwarz gefärbten Betonchargen wurden aus zwei unterschiedlichen Auslaufhöhen eingebaut vor und nach dem Kürzen des Kontraktorrohres.

Der damit verbundene Fließmechanismus wird als systematisch angesehen für eine mehrstufige Betonage, bei der das Kontraktorrohr in definierten Schritten gekürzt wird und bei der der ältere Beton auf- und auswärts verdrängt wird, was auf einen Aufwallmechanismus hindeutet.

Hinweis: Der rot gefärbte Beton der 3. Charge ist nur als dünne Schicht zwischen der 2. (grauen) und 4. (gelben) Charge erkennbar. Dies könnte auch eine Änderung des Fließmusters hindeuten, z.B. bei einer ausgeprägten Änderung der Rheologie, oder durch die Randbedingungen (innerhalb der Bohrung) erzwungen sein.

Abbildung 17: Querschnitt eines Bohrpfahls, der mit unterschiedlich eingefärbtem Kontraktorbeton betoniert wurde (Böhle, Pulsfort, 2014), mit Anzeichen für einen Aufwalleffekt



Die vorherrschende rheologische Eigenschaft, die das Fließmuster des Betons beeinflusst, ist die Fließgrenze (gekennzeichnet durch das Setzfließmaß). Die Viskosität (gekennzeichnet durch die Setzfließgeschwindigkeit) kann einen Einfluss auf die erforderliche Betonagedauer (langsameres Fließen des Betons) haben. Des Weiteren kann diese die Notwendigkeit der Konsistenzhaltung beeinflussen, die möglichst geringgehalten werden sollte. Die Viskosität beeinflusst auch unmittelbar den (horizontalen) Fließwiderstand des Betons durch die Öffnungen im Bewehrungskorb.

Wenn Fließgrenze und Viskosität mit der Zeit zunehmen, kann es erforderlich sein, die Herstellverfahren während der Betonage anzupassen, z.B. durch Verringerung der Eintauchtiefe des Kontraktorrohrs gegen Ende der Betonage.

6.8 Fließen um Bewehrung und Aussparungen

Wie in *Kapitel 2* ausgeführt, muss der Tragwerksplaner besonderes Augenmerk legen auf jegliche Behinderung des Betonfließens. Jedes Hindernis ist ein Widerstand für das Fließen und verringert das Vermögen des verwendeten Betons, Bewehrungen oder Aussparungen zu umströmen und zu umschließen. Da das tatsächliche Fließen von der Energiehöhe am Ort des Widerstandes abhängt,

gilt eine Behinderung in größerem Abstand vom Auslass des Kontraktorrohres und weiter oben im Element - mit geringerer Betondruckhöhe - als kritischer.

Die Ausbildung des Bewehrungskorbes, Aussparungen, usw. muss den Anforderungen aus den Richtlinien (siehe *Anhang E*) genügen. Zudem können numerische Modellierungen verwendet werden um die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen in der Ausführung festzustellen und die Anordnung mit der geringsten Beeinträchtigung zu bestimmen.

Abstandhalter und andere eingebettete Gegenstände sollten so geformt sein, dass sie das Fließen des Betons erleichtern.

6.9 Betonierprotokolle

Nach jedem Einbau einer Betoncharge sollte bei jedem Kontraktorrohr die Höhe des Betons sowie die Eintauchtiefe gemessen und protokolliert werden.

Die gemessenen Betonspiegelhöhen, die eingebauten Betonmengen sowie die Längen der Kontraktorrohre und Verrohrungen sollten während des Betonierens graphisch dargestellt und mit den Sollwerten verglichen werden, dies unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Aushubüberprofilen. Beispiele für eine solche graphische Darstellung sind in EN 1538 und FHWA GEC10 gegeben.

Ein solcher Vergleich kann helfen, Überprofile oder Hohlräume zu erkennen, die durch Beton ausgefüllt wurden. Unterprofile sind ungewöhnlich und ein Unterverbrauch an Beton kann ein Hinweis auf Instabilitäten, Einsturz oder Vermischung von Stützflüssigkeit, Bohrklein oder Boden mit dem Beton sein. Diese Messungen ermöglichen, ungewöhnliche Verhältnisse in einer Bohrung zu erkennen, was womöglich weitere Untersuchen erfordert.

7 Großmaßstäbliche Versuche

Ein effektiver Weg wesentliche Information über Tiefgründungselemente zu erhalten, ist die Anfertigung ein oder mehrerer großmaßstäblicher Versuchselemente. Diese sollten idealerweise mit dem gleichen Einbauverfahren, Einbaugeräten und Baustoffen wie das reale Bauwerkselemente errichtet werden. Probleme, die in den Großversuchen erkannt werden, können adressiert werden bevor die tatsächlichen Tiefgründungselemente hergestellt werden. Die Großversuche ermöglichen auch Verbesserungen im Herstellungsprozess durchzuführen und Annahmekriterien zu entwickeln.

Umfang und Ausmaß der Großversuche sollte in einem angemessenen Verhältnis zur Projektgröße, -komplexität und zu den Projektrisiken stehen. Die zu prüfenden Parameter sollten aus den nachfolgenden Bereichen ausgewählt werden:

- Entwurf- und der Ausführungsdetails
- Frischbetoneigenschaften
- Einbauverfahren, Erfahrung und Kompetenz des Bauunternehmens
- Erfahrung mit den gegebenen Baugrundeigenschaften

Dies kann einen Aushub erfordern, um die hergestellten Elemente bis zu einer ausreichenden Tiefe freizulegen.

In der Praxis werden solche Versuche vom beauftragten Bauunternehmen am besten nach Einrichtung der Baustelle, aber vor Beginn der tatsächlichen Tiefgründungsarbeiten durchgeführt. Die Dauer und Kosten der Versuche müssen vom Auftragnehmer frühzeitig erkannt und in den Ausschreibungsunterlagen detailliert spezifiziert werden.

Falls finanzielle und/oder zeitliche Einschränkungen solche Großversuche nicht zulassen, wird empfohlen, zumindest, in Ergänzung zu den Laborversuchen der Eignungsprüfung, die üblicherweise im Labor des Betonlieferanten durchgeführt werden, Betonannahmeversuche auf der Baustelle durchzuführen.

8 Qualitätskontrolle des fertiggestellten Bauwerks

8.1 Allgemeines

Es ist unabdingbar, dass die Baufirma die einschlägigen Normen für die Qualitätssicherung und -kontrolle einhält. Zudem muss der Herstellungsprozess und dessen Überwachung von kompetenten Personen mit geeigneter Ausbildung, Qualifikation und Erfahrung durchgeführt werden.

Bohrpfähle und Schlitzwände werden i.d.R. gegen die Aushubwand betoniert und das Betonieren kann von der Geländeoberfläche nicht eingesehen werden. Imperfektionen des Festbetons von Tiefgründungen sind unvermeidlich, auch wenn bewährte Bauverfahren seitens der Baufirma angewandt wurden. Die Qualitätskontrolle des fertiggestellten Bauwerks sollte daher die Akzeptanz von Imperfektionen vorsehen, sofern diese für die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der hergestellten Elemente nicht bedeutsam sind. Um eine effiziente und konsistente Überprüfung und Annahme zu fördern, sollten akzeptable Imperfektionen eindeutig in Arbeitsabläufe und Kontroll- und Prüfanforderungen identifiziert werden.

Die Identifikation akzeptable Imperfektionen kann auf vorangegangene Erfahrungen oder Großversuche vor Beginn der tatsächlichen Bauarbeiten basieren. Es ist normalerweise besser, Zeit und Ressourcen für Versuche vor Baubeginn aufzuwenden als detaillierte und teure Prüfungen zur Qualitätskontrolle zu spezifizieren, die nach der Bauwerksfertigstellung durchgeführt werden. Es ist auch möglich, eine begrenzte Anzahl von Bohrpfählen oder Schlitzwandelementen nach der Herstellung der ersten Elemente freizulegen und zu prüfen, welche einen Teil des QS bzw. QK-Verfahrens darstellen können und eine Implementierung von korrigierenden Maßnahmen zu einem frühen Zeitpunkt zulässt.

8.2 Prüfverfahren nach Fertigstellung

Gewöhnlicherweise stehen eine Vielzahl an zerstörende und zerstörungsfreie Methoden zur Verfügung, um Informationen über die Geometrie und die Qualität eines Pfahls oder Schlitzwandelements zu erhalten.

Ein Überblick dieser Methoden ist in *Anhang C* gegeben.

Zerstörungsfreie Prüfungen sind häufig schwierig korrekt zu interpretieren und erfordern Expertenwissen und Erfahrung.

Imperfektionen fallen im Allgemeinen in eine von drei Kategorien:

- abweichende Materialeigenschaften
- Bluten (Wasserrinnen)
- Schattenbildung durch die Bewehrung

Eine weitere Beschreibung der Imperfektionskategorien mit zugehörigen Beispielen ist in *Anhang D* gegeben.

Falls Imperfektionen in gehäuftem Umfang als Fehlstellen bewertet werden, ist es möglich einen Imperfektionsmechanismus zu postulieren, der, falls rechtzeitig erkannt, Änderungen im Entwurf, dem Material oder den Verfahren ermöglicht, um ein weiteres Auftreten zu verhindern.

Imperfektionen können durch ungeeigneten Entwurf oder durch Beton mit ungeeigneten Fließeigenschaften oder unzureichender Stabilität für das gewählte Einbauverfahren oder durch mangelhafte Ausführung verursacht werden. Bei Anwendung der Empfehlungen dieses Leitfadens,

insbesondere bei Verfolgung des gegenseitigen Ansatzes der Interaktion zwischen allen Beteiligten, sollten Imperfektionen minimiert werden können.

9 Numerische Modellierung des Betonflusses

9.1 Einleitung

Die Methoden der numerischen Modellierung (z.B. bei der Verwendung eines Bingham-Fluid-Modells) sind extrem hilfreich, um die Bedeutung einzelner Faktoren, die das Fließen des Betons beeinflussen, zu verstehen als auch die Sensitivität gegenüber Änderungen jedes Faktors zu beurteilen. Dies ist in *Tabelle F.1* dargestellt.

Durch die Einstellung der rheologischen Eigenschaften des Betons und der Stützflüssigkeit, wie auch durch Festlegung der Randbedingungen, ist es möglich den Gesamtfluss des Betons innerhalb des Aushubs realistisch zu modellieren.

9.2 Durchgeführte Studien/Untersuchungen

Die Arbeitsgruppe hat mit akademischen Partnern zusammengearbeitet, um die wesentlichen Zusammenhänge und zugehörige Sensitivitäten durch eine Recherche von Modellstudien festzustellen.

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis eines Bohrpfahls mit Bewehrungskorb mit einem Durchmesser von 1,5 m und einer Tiefe von 16 m, wobei die Betonage ein abgestuftes Ziehen des Kontraktorrohrs simuliert. Weitere Simulation mit numerischen Modellen seitens der akademischen Partner sind in Li et al, 2018 zusammengefasst.

Simulationen zeigen, dass der Gesamtfluss erfolgreich modelliert werden kann und einzelne Faktoren, um deren einzelnen Einfluss auf die Fließmechanismen aufzuzeigen, isoliert werden können. Beispielsweise kann gezeigt werden, dass das Einbringen eines Betons mit signifikant geringerer Fließgrenze in bereits eingebrachtem Beton (mit einer hohen Fließgrenze) zu unregelmäßigen Fließmustern führen kann.

Abbildung 18: Simulationen die einen auswölbenden Fluss des Betons aufweisen mit Geschwindigkeitsstromlinien (links), und mit eingefärbtem Beton im Anschluss eines abgestuften Ziehens des Kontraktorrohrs (Li et al, 2018).

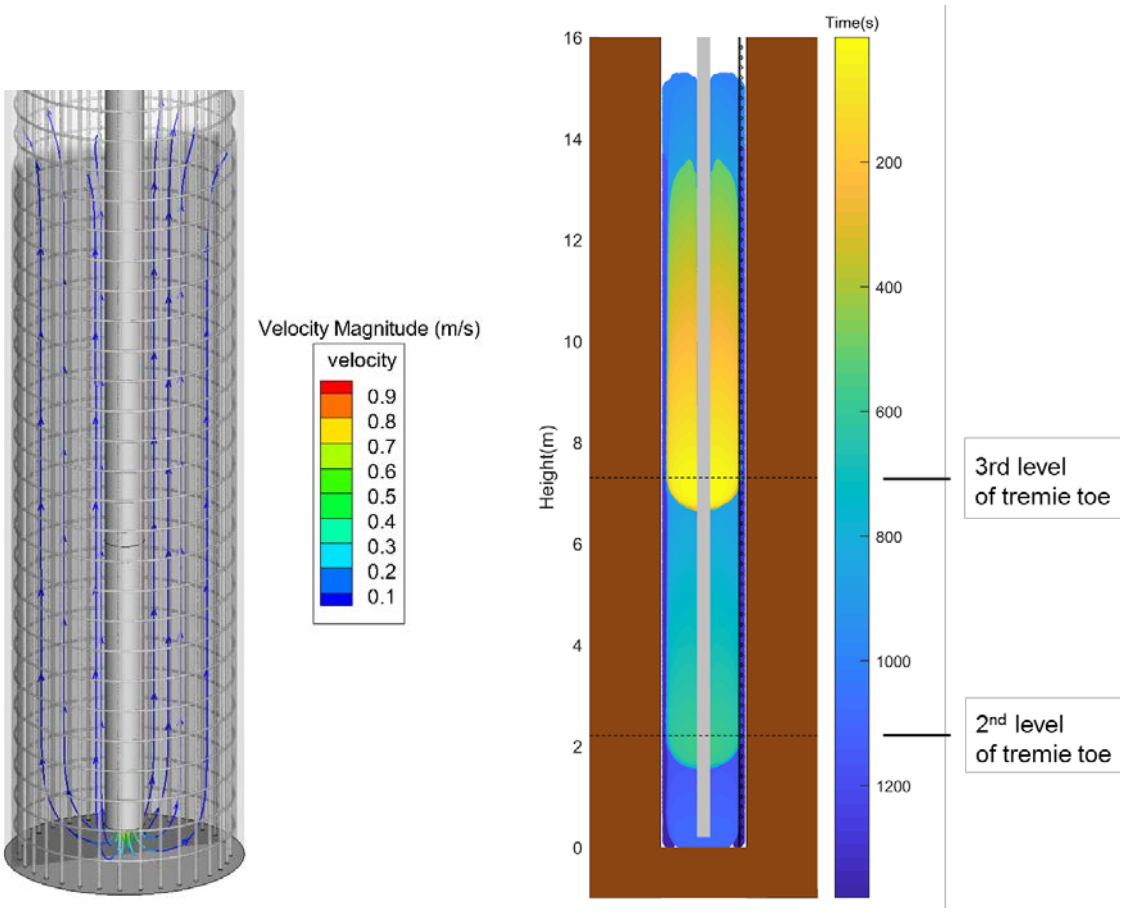


Abbildung 18 (Forts.):

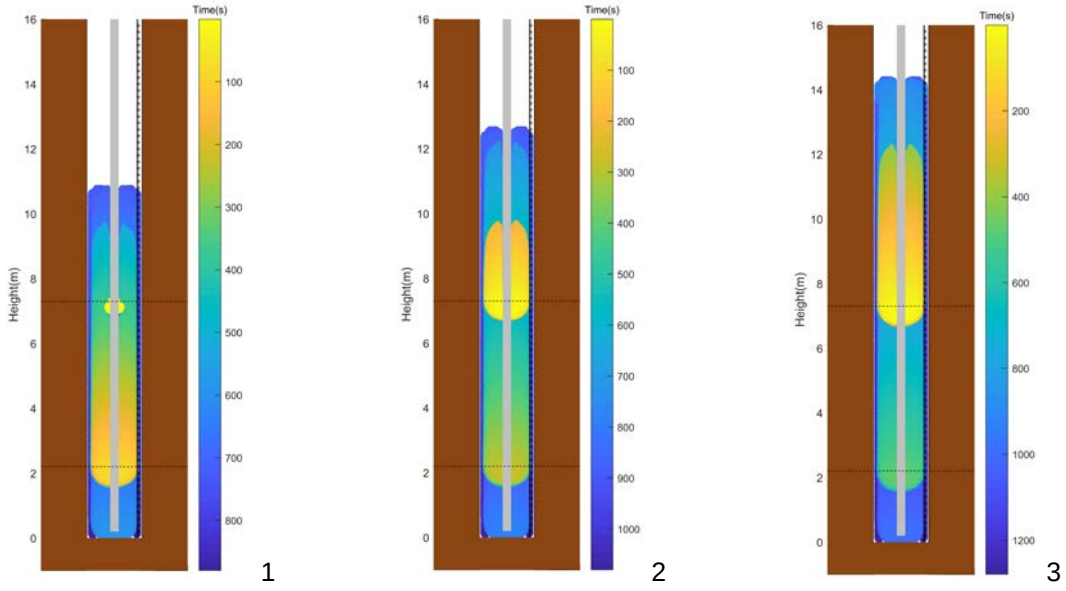
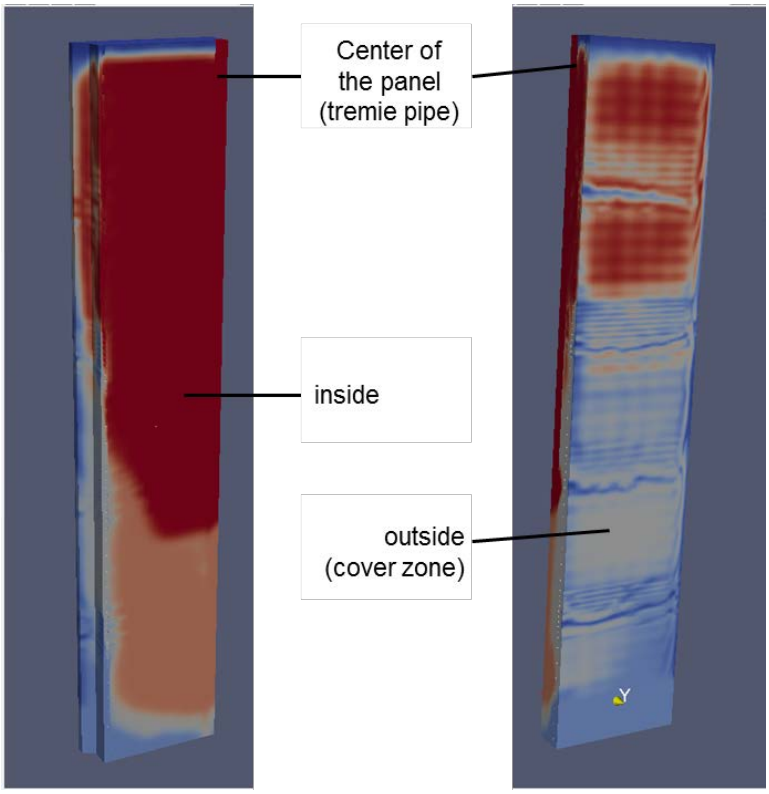


Abbildung 19 zeigt die Simulation eines bewehrten Schlitzwandelementes mit der Variation des Bewehrungsabstandes in unterschiedlichen Höhen, was auf das Risiko von Einschlüssen in der Betondeckung aufgrund der Einschränkung des Betonflusses unterstreicht (Li et al, 2018).

Abbildung 19: Simulationen die einen auswölbenden Fluss des Betons aufweisen in einem Viertel eines Schlitzwandelementes, gezeigt von innen (links) und von außen eines Viertel Elementes (rechts) mit Einschlüssen aufgrund der Einschränkung des Betonflusses (zur Verfügung gestellt von Jan van Dalen)



Eine Sichtung der Modellstudien ergab eine Reihe von wichtigen Schlussfolgerungen, die in Tabelle F.1 diskutiert werden. Weitere Details zu den Methoden der numerischen Modellierung sind in dem gemeinsamen Forschungsbericht der Arbeitsgruppe und die akademischen Partner gegeben (Li et al, 2018).

9.3 Anwendungsgrenzen

Die Berechnungszeit für Simulationen hängt vom Detaillierungsgrad des Modells selber ab und kann sich, mit heutiger Computertechnologie, bis zu mehreren Wochen für eine einzelne Simulation erstrecken. Die genaue Definition der physischen Form und Größe des Bewehrungskorbes erhöht die Berechnungszeit signifikant. Die Möglichkeit den Bewehrungskorb mit einer porösen Membran zu ersetzen, führt zu einer guten Korrelation, erfordert jedoch eine viel kürzere Berechnungszeit (Roussel und Gram, 2014).

Es ist wichtig, die Komplexität des Modells mit der anvisierten Sensitivität gegenüber dem Effekt der Parameteränderung (basierend auf Erfahrungen vorangegangener Simulationen) aus zu balancieren, um die Berechnungszeit zu reduzieren und hierbei die Durchführung mehrere Simulationen zu ermöglichen.

Die numerische Simulation ist ein mächtiges Werkzeug, um die herrschenden, aus den physikalischen Modellen hergeleiteten, partiellen Differenzialgleichungen zu lösen. Somit ist die Bedeutung der numerischen Simulation auf die Leistung der zugrundeliegenden physikalischen Modelle (z.B. Bingham-Fluid-Modell) beschränkt.

Weitere Arbeiten sind im Gange, bei denen realmaßstäbliche Versuche verwendet werden und dann die Erkenntnisse der Modelle gegenüber dem tatsächlichen Versuch validiert werden.

Anhang A – Prüfverfahren zur Charakterisierung von Frischbeton

Die in diesem Anhang beschriebenen praxistauglichen Prüfverfahren können zur Bestimmung folgender Eigenschaften herangezogen werden:

- Verarbeitbarkeit, beschrieben durch Fließgrenze und Viskosität
- Konsistenzhaltung, inklusive Thixotropie
- Stabilität

Hinweis: die Prüfverfahren sollten gemäß der in diesem Anhang gegebenen Beschreibungen durchgeführt werden. Jegliche Abweichung hiervon sollte eindeutig dokumentiert werden.

A.1.1 Prüfverfahren zur Bestimmung des Setzfließmaßes nach EN 12350-8 und ASTM C1611

Grundsatz: Das Setzfließmaß ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit und kann mit der Fließgrenze direkt korreliert werden.

Ablauf: Dieses Prüfverfahren basiert auf dem Setzversuch, der in EN 12350-2 und ASTM C143 beschrieben wird. Der 300 mm hohe Hohlkegelstumpf und die Grundplatte werden befeuchtet und der Kegelstumpf wird auf die horizontale Grundplatte platziert, siehe *Abbildung A.1*. Der Kegelstumpf wird dann mit Frischbeton gefüllt. Wenn der Kegelstumpf angehoben wird, beginnt der Beton sich zu setzen und zu fließen. Im Anschluss wird der Durchmesser des ruhenden Betons gemessen (Setzfließmaß in mm).

Die gewonnene Betonprobe sollte aufgemischt werden, bevor die Prüfung durchgeführt wird. Hierfür sollten ein Mischbehälter mit mindestens 10 l Nennvolumen sowie eine Schaufel mit rechteckiger Öffnung verwendet werden.

Die Prüfgeräte, bestehend aus einem Hohlkegelstumpf als Form und einer ebenen Grundplatte aus Stahl wie in *Abbildung A.1* dargestellt müssen den Anforderungen der EN 12350-2 oder ASTM C143 genügen. Form und Grundplatte sind dieselben wie für den Setzversuch und die Grundplatte sollte dementsprechend aus einem nicht-absorbierenden Material bestehen und nicht von Zementleim angegriffen werden dürfen, sodass Setzen und Fließen des Betons nicht eingeschränkt sein können.

Es ist ebenso wichtig die saubere Platte sowie die Form zu befeuchten, bevor der Kegel mit Beton gefüllt wird.

Vorausgesetzt, dass die Verarbeitbarkeit ausreichend zur Selbstverdichtung ist, muss der Beton nicht in Lagen verdichtet werden und der Beton kann in einem Vorgang ohne Vibration oder mechanisches Verdichten eingefüllt werden. Der Beton sollte über die Form hinaus gefüllt werden und im Anschluss sollte die Oberfläche durch sägende und walzende Bewegungen mit einem Stab abgezogen werden. Die Grundplatte muss von verschüttetem Beton gereinigt werden, bevor die Form sorgfältig und durch eine stetige vertikale Bewegung (innerhalb von 30 s nach Befüllen der Form) in 1-3 Sekunden gehoben wird.

Nachdem das Setzen und Fließen des Betons geendet hat, wird der Durchmesser der Ausbreitung zweimal rechtwinklig zueinander zu den nächstgelegenen 10 mm gemessen und als mittlerer Durchmesser protokolliert. Sollten beide Einzelwerte um mehr als 50 mm voneinander abweichen, ist eine neue Probe zu entnehmen und zu prüfen.

Anmerkungen: Dieses Prüfverfahren kann mit dem Setzfließgeschwindigkeitsversuch (A1.2) und den Visual Stability Index Test (A.1.3) kombiniert werden.

A.1.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Setzfließgeschwindigkeit

Grundsatz: Die Setzfließgeschwindigkeit ist ein Maß der Verarbeitbarkeit und kann mit der Viskosität direkt korreliert werden.

Ablauf: Der Aufbau dieser Prüfung entspricht der des Setzfließversuches, siehe *A.1.1* und *Abbildung A.1*. Zusätzlich wird eine Stoppuhr benötigt, die auf 0,1 Sekunden genau angehalten werden kann.

Wenn der Kegel angehoben wird, beginnt der Beton sich zu setzen und zu fließen. Dabei wird die Zeit t_{final} [s] gemessen, die der Beton bis zum Erreichen des endgültigen Durchmessers D_{final} [mm] benötigt.

Der Durchmesser entspricht dem Setzfließmaß (siehe *A.1.1*), d.h. der Mittelwert der zwei Durchmesser des Betonkuchens, die rechtwinklig zueinander und auf 10 mm genau gemessen und protokolliert werden.

Die Stoppuhr wird unmittelbar, wenn der Kegel die Grundplatte verlässt, gestartet und auf die nächstgelegene Sekunde, in der der Beton nicht mehr fließt (wenn die horizontale Bewegung <1 mm/s beträgt) gestoppt.

Der zurückgelegte Weg (D_{final} - 200)/2 [mm] geteilt durch die erforderliche Zeit t_{final} [s] ist die Setzfließgeschwindigkeit [mm/s].

Anmerkungen: Dieses Prüfverfahren kann mit dem Setzfließversuch (A.1.1) und den Visual Stability Index Test (A.1.3) kombiniert werden.

Das ursprüngliche Prüfverfahren legt eine Fließzeit T_{500} fest, die als Zeit bis zum Erreichen eines Durchmessers von 500 mm definiert ist. Da der Kontraktorbeton sich nicht zwangsläufig so weit ausbreiten wird, wird diese konkrete Methode für Kontraktorbeton als ungeeignet erachtet.

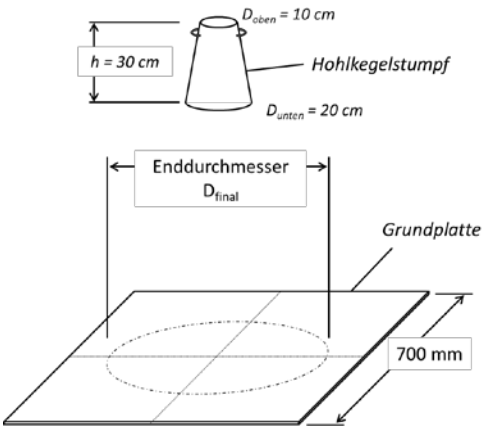


Abbildung A.1: Prüfgeräte für das kombinierte Prüfverfahren zur Bestimmung des Setzfließmaßes, der Setzfließgeschwindigkeit und des Visual Stability Index (*A.1*).

A.1.3 Visual Stability Index Test nach ASTM C1611 (Prüfverfahren zur visuellen Bewertung der Frischbetonstabilität)

Grundsatz: Der Visual Stability Index (VSI) ist das Ergebnis einer visuellen Bewertung und klassifiziert den Widerstand gegen Entmischung.

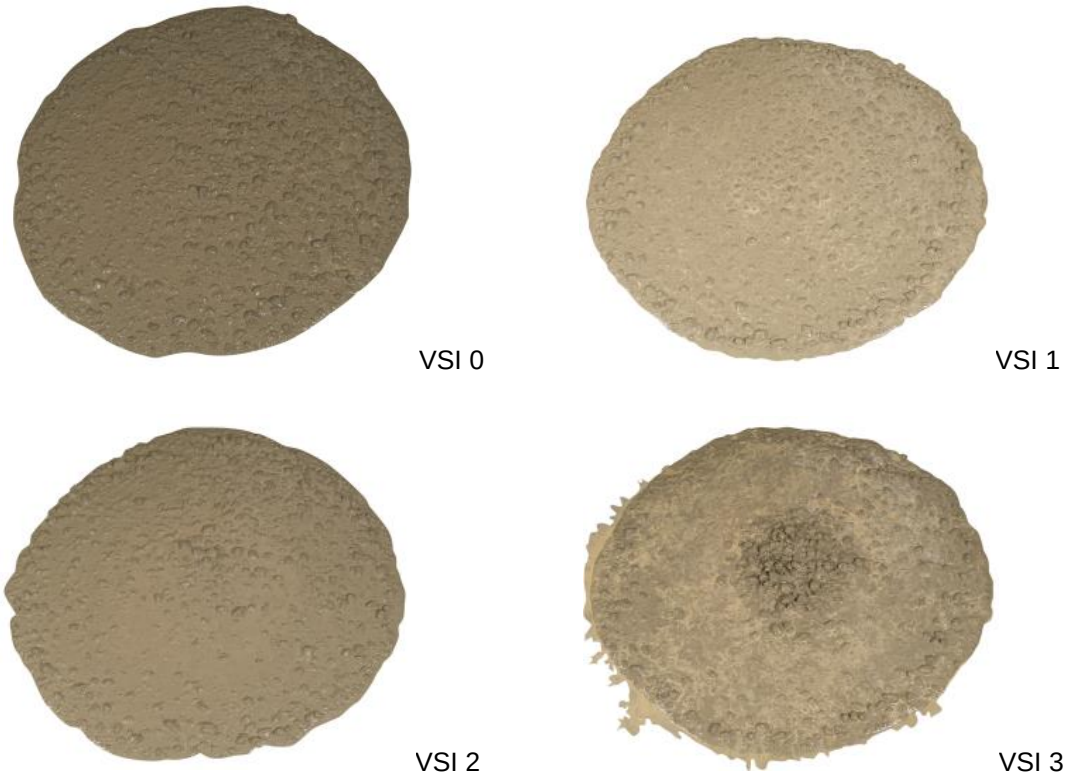
Ablauf: Analog dem Setzfließversuch, siehe *A.1.1*, gefolgt von einer visuellen Inspektion unter Zuhilfenahme der Kriterien in Tabelle A.1.

Anmerkungen: Dieses Prüfverfahren kann ausschließlich auf offensichtliche Entmischungstendenzen hinweisen und könnte daher nicht ausreichend sein, um empfindliche Betonmischungen zu identifizieren. Für eine zuverlässigere Messung und im Zweifelsfall sollte das Prüfverfahren zur Bestimmung der statischen Sedimentationsstabilität im Zylinder (*A.7*) oder im Siebversuch (*A.8*) verwendet werden.

Tabelle A.1: Visual Stability Index, VSI-Klassen (nach ASTM C1611)

VSI-Klasse	Kriterien
0 = hoch stabil	Kein Hinweis auf Entmischung oder Bluten
1 = stabil	Kein Hinweis auf Entmischung und ein leichtes Bluten, welches als leichtes Schimmern auf dem Beton beobachtet werden kann
2 = instabil	Ein leichter Kranz (aus Zementleim oder Wasser) ≤ 10 mm um den Betonkuchen und/oder ein Gesteinskörnungshaufen im Zentrum der Betonmasse
3 = hoch instabil	Eindeutige Entmischung, die durch einen großen Kranz > 10 mm um den Betonkuchen und/oder einen großen Gesteinskörnungshaufen im Zentrum der Betonmasse

Abbildung A.2: Beispiel für VSI-Klassen



Mit freundlicher Genehmigung von BASF

A.2 Prüfverfahren zur Bestimmung des Setzmaßes nach EN 12350-2, ASTM C143

Grundsatz: Das Setzmaß des Betons ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit.

Ablauf: Der Frischbeton wird in einen 30 cm hohen Hohlkegelstumpf eingefüllt, siehe *Abbildung A.1*. Mit dem Abheben des Kegelstumpfs setzt sich der Beton und die vertikale Strecke des Setzens des Betons wird gemessen.

Anmerkungen: Ein gravierender Mangel an Stabilität kann ggf. visuell erkannt werden

Hinweis 1: *Für den Bereich des Setzfließmaßes 400-550 mm haben Kraenkel und Gehlen (2018) einen äquivalenten Bereich des Setzmaßes zwischen 220-270 mm ermittelt. Sollte das Setzmaß als Annahmekriterium anvisiert werden ist es jedoch notwendig, während der Eignungsprüfung eine Korrelation für die konkreten Betonmischungen zu bestimmen.*

Hinweis 2: *Aufgrund der definierten Toleranz von 30 mm im Setzversuch ist dieses Prüfverfahren ungeeignet für sehr fließfähige Kontraktorbetone. Des Weiteren gibt EN 206:2014, in Anhang L an, dass aufgrund der mangelnden Sensitivität der Prüfmethode die Verwendung des Setzmaßes ausschließlich für $D_{slump} \leq 210$ mm empfohlen wird. Folglich sollte dieses Prüfverfahren ausschließlich dann verwendet werden, wenn die Verarbeitbarkeit durch einen Zielwert kleiner 210 mm festgelegt werden kann.*

A.3 Prüfverfahren zur Bestimmung des Ausbreitmaßes nach EN 12350-5

Grundsatz: Das Ausbreitmaß des Betons ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit.

Ablauf: Der Frischbeton wird in einen 20 cm hohen Hohlkegelstumpf eingefüllt und verdichtet. Nach dem Anheben des Kegelstumpfes wird die Tischplatte 15-mal angehoben und fallengelassen und das Ausbreitmaß bestimmt.

Anmerkungen: Ein gravierender Mangel an Stabilität kann ggf. visuell erkannt werden. Aufgrund der Stöße kann es möglich sein, eine Tendenz für dynamische Entmischung zu identifizieren.

Hinweis 1: *Für den Bereich des Setzfließmaßes 400-550 mm haben Kraenkel und Gehlen (2018) einen äquivalenten Bereich des Ausbreitmaßes zwischen 560-640 mm ermittelt. Sollte das Ausbreitmaß als Annahmekriterium anvisiert werden, ist es jedoch notwendig während der Eignungsprüfung eine Korrelation für die konkreten Betonmischungen zu bestimmen.*

Hinweis 2: *Im Vergleich zum Setzfließversuch hat das Ausbreitmaß eine geringere Sensitivität. Zudem werden dynamische Stöße verwendet, welche für eine dynamische Verdichtung (zum Beispiel beim Einbau von Rüttelbeton) geeigneter sein kann. Wenn das Ausbreitmaß für die Annahmeprüfung verwendet wird, muss eine Toleranz von 40 mm berücksichtigt werden, wie in EN 206:2014, Anhang L angegeben.*

Hinweis 3: *Die anfängliche Ausbreitung (vor den 15 Stößen) lag im Bereich 380-500 mm. Diese Werte sind geringer und außerdem weniger aussagekräftig als die aus dem Setzfließversuch, da infolge des kleineren Kegels (200 mm für das Ausbreitmaß und 300 mm für den Setzfließversuch) die Energiezufuhr geringer ist.*

A.4 Auslauftrichterversuch

A.4.1 Modifizierter Auslauftrichterversuch

Grundsatz: Die Auslaufzeit des Betons aus dem modifizierten Hohlkegelstumpf ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit und kann mit der Viskosität direkt korreliert werden

Ablauf: Ein hohler Zylinder wird auf einem umgedrehten Hohlkegelstumpf mit einer Klappe auf der unteren Öffnung befestigt, die vor Versuchsbeginn geschlossen ist, siehe *Abbildung A.3*.

20 l und Frischbeton werden in diese Form, mit einem Überschuss am oberen Ende, gefüllt. Die Oberfläche wird mit einem Stab oder Lineal abgezogen. Das Befüllen der Form sollte innerhalb von 1 Minute erfolgen.

Innerhalb der nächsten Minute wird die Klappe schnell geöffnet und die Auslaufzeit des freifallenden Betons bis zum vollständigen Entleeren des Kegels dokumentiert. Die Zeit wird mit einer Genauigkeit von 0,1 Sekunden dokumentiert.

Anmerkungen: Um 20 l (rechnerisch 19.9 l) an Frischbeton insgesamt zu enthalten, muss die Höhe des Zylinders 465 mm bei einem konstanten Innendurchmesser von 200 mm (mit einem Nennvolumen von 14.6 l, zusätzlich zum Volumen des Hohlkegelstumpfs von 5.3 l) betragen. Der Kegelstumpf kann der aus dem Setzmaßversuch sein.

Eine alternative Methode zur Bestimmung der Trichterauslaufzeit ist der Auslauftrichterversuch mit dem invertierten Trichter, siehe A.4.2.

Abbildung A.3: Geräte (Beispiel) für den modifizierten Auslauftrichterversuch (A.4.1)

Mit freundlicher Genehmigung von *Thomas Kraenkel*

A.4.2 Auslauftrichterversuch mit dem invertierten Trichter

Grundsatz: Die Auslaufzeit des Betons aus dem invertierten Trichter ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit und kann mit der Viskosität direkt korreliert werden.

Ablauf: Unter Verwendung derselben Geräte wie im Setzfließversuch gemäß *A.1* und zusätzlich einer Stoppuhr wird die Form kopfüber (invertiert), d.h. mit der 100 mm weiten Öffnung nach unten, auf der ebenen Grundplatte aus Stahl platziert. Der Beton wird in einem Vorgang in die Form gefüllt und mit einem Stab 25-mal verdichtet. Nach Abziehen der Oberfläche und einer Wartezeit von 30 Sekunden wird der Kegel vertikal um ca. 40 cm innerhalb von 2-4 Sekunden angehoben. Die Auslaufzeit des Betons wird, mit einer Genauigkeit von 0,1 Sekunden, bis zum Entleeren des Kegels protokolliert.

Anmerkungen: Wird dieses Prüfverfahren für die Konformitäts- oder Annahmeprüfung anvisiert, sollte ein Zielwert während der Eignungsprüfung bestimmt und vereinbart werden.

Aufgrund des geringeren Volumens an Beton, im Vergleich zum modifizierten Auslauftrichterversuch (A.4.1), und aufgrund eines möglichen Einflusses durch den Hebevorgang, kann die Auslaufzeit aus dem (einfachen) invertierten Trichter ungenauer sein, insbesondere bei geringen Viskositäten. Es wurde jedoch gezeigt, dass dieser Versuch zuverlässige Informationen für Kontraktorbetone gibt, um eine geringe, mittlere oder hohe Viskosität zu identifizieren.
Ohne detaillierte Festlegungen kann eine Auslaufzeit von mindestens 2 Sekunden und maximal 7 Sekunden für den Bereich der Annahmeprüfung angewandt werden.

.

A.5 Versuch mit der Hand-Flügelsonde

Grundsatz: Der Scherwiderstand von Frischbeton ist ein Maß für dessen Fließgrenze.

Ablauf: Vorbereitung einer Frischbetonprobe in einem Eimer mit ausreichendem Volumen und ca. 20 cm Höhe.

Verschiebe den Zeiger an der Messuhr des Drehmomentmessers gegen den Uhrzeigersinn auf null.

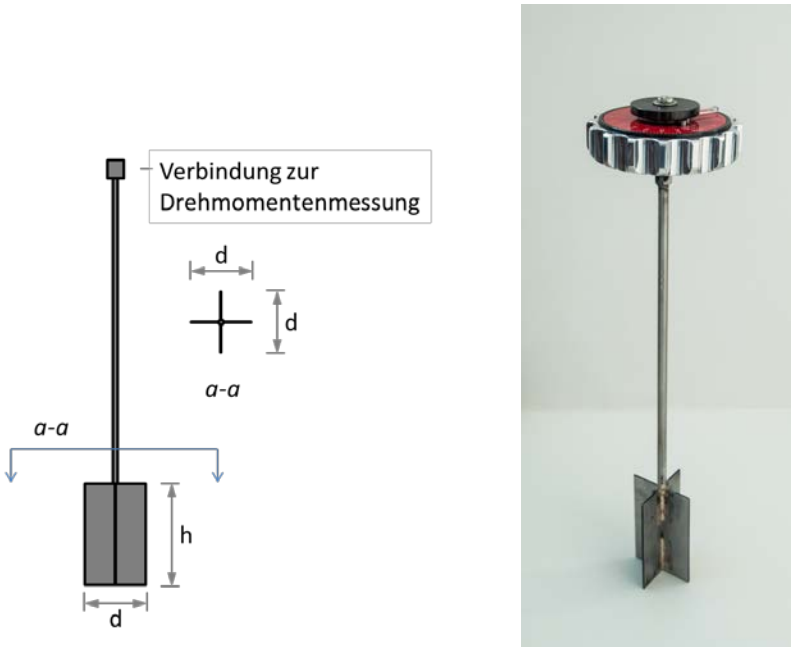
Führe die Flügelsonde langsam in die Betonprobe ein, ohne diese weiter zu stören. Die Oberkante der Flügel sollte mindestens 50 mm unterhalb der Betonoberkante liegen. Rotiere die Flügelsonde händisch und lese das maximale Drehmoment ab.

Anmerkungen: Ein Unterschied im gemessenen Drehmoment im Frischbeton vor und nach einer Ruhephase ist ein Hinweis bezüglich der Thixotropie des Betons. Verwenden Sie bis zu 5 Flügelsonden, um eine entsprechende Anzahl von Betonproben nach unterschiedlichen Ruhephasen zu prüfen. Führen Sie in jede Probe eine Flügelsonde ein und prüfen Sie den Scherwiderstand nach zum Beispiel 0, 2, 4, 8 und 15 Minuten. Die Zunahme der statischen Fließgrenze ist ein direktes Maß für die Betonthixotropie und kann als Strukturentwicklungsrate A_{thix} (in Pa/min) berechnet werden, siehe Roussel und Cussigh, 2008. Eine 100%-ige Zunahme in 15 Minuten kann als übermäßige Thixotropie bewertet werden. Zur absoluten Beurteilung der zulässigen Thixotropie muss eine Korrelation zum Setzfließmaß (für die Verarbeitbarkeit) festgelegt werden.

Um eine ausreichende Selektivität zu gewährleisten,müssen die Flügelsonden im Vergleich zu den typischen Flügelsonden für kohäsive Böden angepasst werden. Die Flügelsonde für Beton hat eine Höhe h = 100 mm und einen Durchmesser d = 60 mm (4 Blätter im 90 Grad Winkel, jedes 30 mm breit), siehe *Abbildung A.4*. Der Stab (= Achse der Flügelsonde) muss ausreichend lang sein (ca. 300 mm), sodass die Flügelsonde ausreichend weit unter die Betonoberfläche abgesenkt werden kann.

Hinweis 1: *Ein Durchmesser von 50 mm für die Flügelsonde wird auch als akzeptabel angesehen.*

Abbildung A.4: Abmessungen des Stabs und der Flügel für den Versuch mit der Hand-Flügelsonde (New Zealand Geotechnical Society, 2001)



A.6 Versuch zur Konsistenzhaltung

Grundsatz: Im Versuch zur Konsistenzhaltung wird die Zeitspanne bestimmt, in welcher das Setzfließmaß des Betons nicht unter einen vordefinierten Wert fällt.

Ablauf: Der Setzfließversuch (A1.1) wird nach diskreten Intervallen – bis zur ermittelten Gesamtbetonierdauer für das definierte Element – wiederholt.
Die Normenreihe EN 12350 (Prüfverfahren für Frischbeton) wird zurzeit aktualisiert und Anforderungen zur Probenentnahme und Lagerung für Konsistenzhaltungsversuche einzuführen. Die Anforderungen (im Entwurf) sind unten beigefügt.

Stelle den Beton (für Feldversuche bevorzugt 3 m^3, aber mindestens 1m^3) her.

Lagere die Probe (oder eine ausreichende Anzahl von Teilproben) in verschließbaren, zylindrischen Behältern aus einem nicht-absorbierenden, gegenüber Zementleim widerstandsfähigen Material. Die Behälter sollten ein Höhen-zu-Durchmesser-Verhältnis im Bereich 0,7-1,3 haben und ausreichend groß sein, um die (Teil-) Proben vollständig aufzunehmen.

Die zu lagernde Betonmenge darf das 1,5-fache der für die Untersuchung erforderlichen Betonmenge nicht unterschreiten, und soll den versiegelten Behälter zwischen 25 mm und 50 mm unterhalb des Deckels ausfüllen.

Wenn beabsichtigt wird, die Probe zur Messung der Konsistenzhaltung zu verwenden, sollte der Beton aus dem versiegelten Behälter in einem Durchmischungsbehälter umgefüllt werden und mittels einer Schaufel oder einem Löffel durchmischt werden, bevor die Prüfung stattfindet.

Führen Sie Setzmaßversuche nach jeweils einer Stunde (zwei Stunden für Verarbeitungszeiten über 4 Stunden) durch.

Anmerkungen: Für einen vereinfachten Konsistenzhaltungsversuch kann der zu prüfende Beton in einem abgedeckten Schubkarren aufbewahrt werden.
Zur Überprüfung der Thixotropie werden zwei Setzmaßtrichter mit Frischbeton gefüllt. Führe einen Setfließversuch unmittelbar aus. Nach einer Ruhephase von 15 Minuten führe den 2. Setzfließversuch aus. Wenn die Differenz beider Werte > 30 mm ist, sollte der Versuch wiederholt werden.
Erste Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben weisen darauf hin, dass die Thixotropie signifikant ist, wenn das Setzmaß nach 15 Minuten Ruhephase 50 mm (oder mehr) unterhalb des anfänglichen Wertes liegt.

A.7 Statischer Sedimentationsversuch

A.7.1 Statischer Sedimentationsversuch im Zylinder (oder Auswaschversuch) nach ASTM C1610 und DAfStb Richtlinie SVB

Grundsatz: Der Versuch bewertet die statische Sedimentation durch Variation der Verteilung der groben Gesteinskörnung über die Höhe.

Ablauf: Eine (hohle) Säule aus drei miteinander verbundenen Zylindern wird mit Frischbeton befüllt (und verdichtet), siehe *Abbildung A.5* (die ursprüngliche Norm und Richtlinie erlauben keine Verdichtung oder Vibration für SVB Mischungen). Nach einer definierten Zeit von z.B. 2 Stunden wird der Anteil an grober Gesteinskörnung im oberen und unteren Zylinder durch Auswaschen und Siebung bestimmt. Die Differenz der groben Gesteinskörnung ist ein Maß für die Entmischung.

Anmerkungen: Dieses Prüfverfahren wurde für selbst-verdichtenden Beton (SVB) entwickelt, der bestimmungsgemäß eine geringe Fließgrenze aufweist und bei dem eine Entmischung der Gesteinskörnung durch die Viskosität eingeschränkt wird, so dassdie Sedimentation zeitabhängig ist.

In Abhängigkeit der Verarbeitbarkeitszeit, auch für Kontraktorbetone, könnte eine längere Wartezeit (als 2 Stunden) geeigneter sein.

Wenn die vollständige Erstarrungszeit berücksichtigt werden soll, kann der Hardenened Visual Stability Index Test (HVSI) verwendet werden, siehe A.7.2.

Abbildung A.5: Aufbau des statischen Entmischungsversuchs gemäß ASTM C1610

A.7.2 Visueller Stabilitätstest an erhärtetem Beton (englisch: Hardened Visual Stability Index (HVSI) Test) nach AASHTO R81

Grundsatz: Dieses Prüfverfahren bewertet die statische Entmischung durch visuelle Beurteilung oder Auszählen der Gesteinskörnungsverteilung in einer ausgehärteten, in zwei Hälften gesägten Probe.

Ablauf: Beton wird ohne gesonderte Verdichtung (etwa Vibration) in eine genormte Zylinderschalung gefüllt, in der dieser ungestört erhärten kann. Sobald die Probe ausreichend fest ist, wird diese axial in zwei Hälften zersägt und die Verteilung der Gesteinskörnung wird mit den genormten Beschreibungen und Fotos verglichen, um die „HVSI-Klasse“ zu bestimmen, siehe *Tabelle A.2*.

Anmerkungen: Dieses Prüfverfahren wurde für selbstverdichtende Betone entwickelt, kann jedoch wahrscheinlich ebenso für Kontraktorbetone verwendet werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass eine vollständige Erhärtung berücksichtigt wird und keine speziellen Geräte außer einer Betonsäge notwendig sind. Die Erhärtungszeit sollte so gewählt werden (mindestens 24 Stunden), dass eine ausreichende Festigkeit zum Zersägen der Probe, d.h. eine Mindestdruckfestigkeit von etwa 6 MPa erreicht werden konnte.

Tabelle A.2: Klassifizierung für den „HVSI–Test“ nach A.7.2

HVSI	Klassifizierung	Beschreibung
0	Stabil	keine Leimschicht im oberen Bereich der zersägten Ebene und/oder keine Varianz in Größe und Anteil grober Gesteinskörnung von oben nach unten
1	Stabil	Geringe Leimschicht mit einer Dicke kleiner oder gleich 6 mm im oberen Bereich der zersägten Ebene und/oder eine geringe Varianz in Größe und Anteil grober Gesteinskörnung von oben nach unten
2	Instabil	Leimschicht mit einer Dicke kleiner oder gleich 25 mm und größer als 6 mm im oberen Bereich der zersägten Ebene und/oder eine moderate Varianz in Größe und Anteil grober Gesteinskörnung von oben nach unten
3	Instabil	Eindeutig entmischt, belegt durch eine Leimschicht mit einer Dicke größer als 25 mm und/oder durch eine erhebliche Varianz in Größe und Anteil grober Gesteinskörnung von oben nach unten

A.8 Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch nach EN 12350-11

Grundsatz: Die Menge an Gesteinskörnung, welche durch ein Sieb mit einer rechteckigen Maschenweite von 5 mm in einen Behälter durchgeht, ist ein Maß für die Entmischungsneigung des Betons.

Ablauf: Eine Probe von 10 l (± 0.5 l) Frischbeton wird in einem mit Deckel verschlossenen Eimer (zur Vermeidung der Verdunstung) 15 Minuten lang gelagert. Wiege einen leeren Behälter ab, platziere ein (trockenen) Sieb darüber und wiege beides erneut. Setze die Waage auf 0. Nach 15 Minuten Ruhezeit entferne den Deckel vom Eimer, überprüfe das Vorhandensein von Blutwasser (Beobachtung protokollieren). Fülle 4.8 kg (± 0.2 kg) der Betonprobe (inklusive Blutwasser) aus einer Fallhöhe von 500 mm (± 50 mm) kontinuierlich und achtsam auf das Sieb. Entferne nach 120 s (± 5 s) das Sieb senkrecht, ohne Vibration. Die Menge an Material im Behälter wird als entmischter Anteil in % der auf das Sieb gefüllten Masse protokolliert.

Anmerkungen: -

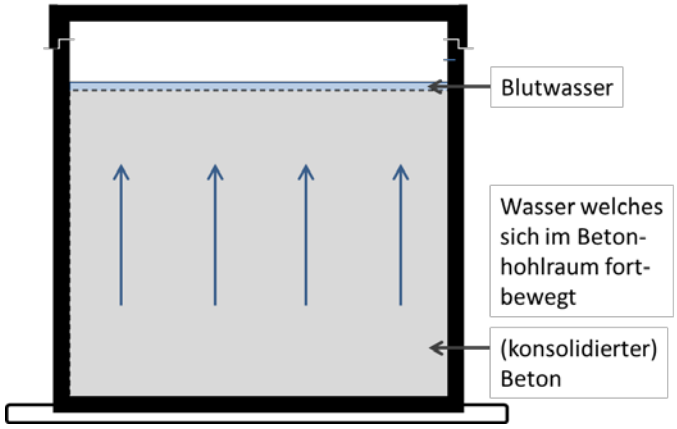
A.9 Blutwasser-Test in Anlehnung an ASTM C232 und NF XP P18-468

Grundsatz: Die Menge an Wasser auf der Oberfläche von Beton in einem Behälter ist ein Maß für dessen Blutneigung, siehe *Abbildung A.6*.

Ablauf: In einem zylindrischen Behälter mit einem Innendurchmesser von 250 mm und einer Höhe von 300 mm wird Beton bis zu einer Füllhöhe von 250 mm gefüllt. Die Absonderung von Wasser an der Oberfläche wird alle 30 Minuten gemessen, bis eine konstante Blutrate bestimmt wird oder bis das Bluten aufhört (mit Erstarrung des Betons).

Anmerkungen: Der Zeitpunkt des Beginns des Blutens und einer konstanten Blutrate nach Beginn des Blutens (siehe *Abbildung 8* in Abschnitt 3.3) sind essenziell zur Beschreibung der Blutneigung des Betons. Eine über 2 Stunden gemittelte Blutrate von weniger als 0.1 ml/min ist akzeptabel. Nach NF XP P 18-468 können die relevanten 2 Stunden mit einer angenommenen konstanten Blutrate dann beginnen, wenn der zweite Wert > 0 (Blutwasser an der Betonoberfläche) gemessen wurde.

Abbildung A.6: Schematischer Aufbau zur Bestimmung des Blutens infolge Gravitation



A.10 Bestimmung der Filtration

A.10.1 Bestimmung der Filtratwassermenge mit der BAUER Betonfilterpresse

Grundsatz: Die Prüfung bildet das Wasserrückhaltevermögen von Frischbeton unter hydrostatischem Druck nach und ermittelt die Wasserabgabe durch einen Filter, wie in *Abbildung A.6* dargestellt.

Ablauf: Ein zylindrischer Behälter wird mit 1,5 l Frischbeton gefüllt und über 5 Minuten mit 5 bar) Druck beaufschlagt. Das vom Beton unter Druck abgesonderte Wasser fließt durch ein Filterpapier und wird in einem zylindrischen Behälter gesammelt. Die ermittelte Filtratwassermenge ist ein Maß für die Stabilität des Betons.

Anmerkungen: Das Größtkorn sollte auf 20 mm begrenzt werden.

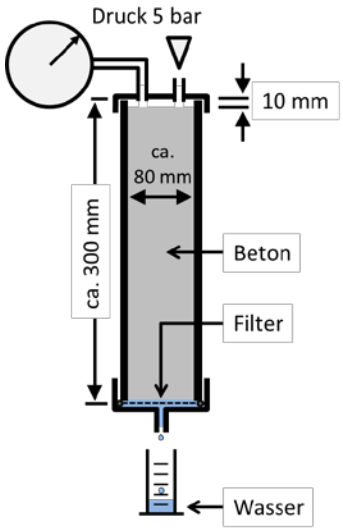
Verwenden Sie spezielles, gehärtetes Filterpapier API mit 90 mm Durchmesser (fann® no 206051).

Gemäß einem Annahmekriterium von 15 l/m³ (aus Z17, CIA) für Kontraktorbeton in Tiefgründungen (>15 m Tiefe) beträgt der entsprechende Prüfwert für eine Probe von 1,5 l etwa 22 ml.

Die Dicke und Konsistenz des Filterkuchens sind zusätzliche Maße für den Widerstand eines Betons gegen den Verlust seiner Verarbeitbarkeit. Ein weicher, flexibler Kuchen wird einem harten Kuchen bevorzugt.

Eine alternative Prüfmethode zur Bestimmung der Filtratwassermenge ist das Prüfverfahren mit der österreichischen Betonfilterpresse, siehe A.10.2.

Abbildung A.7: Aufbau der Prüfung zur Bestimmung des Wasserverlustes von unter Druck stehenden Frischbeton (Bauer).



Hinweis: Die BAUER Betonfilterpresse basiert auf der Prüfung von Bohrflüssigkeiten gemäß API RP 13B-1, auf die auch in EN ISO 10414-1 Bezug genommen wird.

A.10.2 Bestimmung der Filtratwassermenge mit der Betonfilterpresse gemäß ÖVBB-Merkblatt Weiche Betone (Merkblatt, Weiche Betone, 2009)

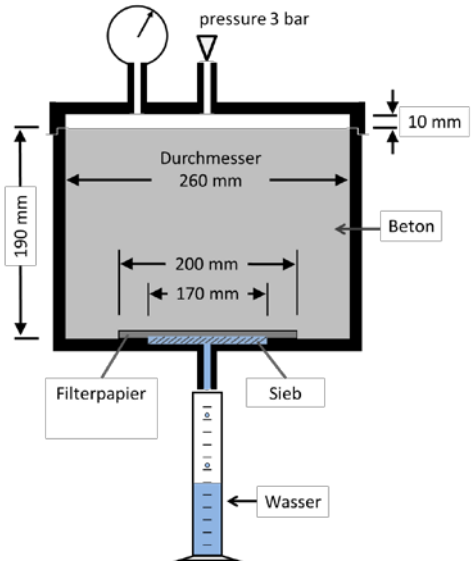
Grundsatz: Die Prüfung bildet das Wasserrückhaltevermögen von Frischbeton unter hydrostatischem Druck nach und ermittelt die Wasserabgabe durch einen Filter, siehe *Abbildung A.8*.

Ablauf: Ein zylindrischer Behälter wird mit 10 l Frischbeton gefüllt und mit Druckluft beaufschlagt (3 bar). Das vom Beton unter Druck abgesonderte Wasser fließt durch ein Filterpapier und wird in einem zylindrischen Behälter gesammelt. Die ermittelte Filtratwassermenge ist ein Maß für die Stabilität des Betons.

Anmerkungen: Prüfungen in Firmenlabors weisen auf eine Korrelation zwischen den Prüfwerten mit der 'österreichischen' und er BAUER Betonfilterpresse hin. Mit $V_{loss\text{-}15,ÖVBB}$ [l/m³] / $V_{loss,BAUER}$ [l/m³] = 1.8 (ca. 2). kann für die Betonfilterpresse eine Filterwassermenge von ca. 25 l/m³ als Äquivalenz zu den 22 ml aus der Prüfung mit der BAUER Betonfilterpresse verwendet werden.

In der österreichischen Richtlinie für Weiche Betone wird eine Stabilitätsklasse FW20 für Kontraktorbeton gefordert, wenn die Tiefe der Tiefgründung 15 m überschreitet. Für die Eignungsprüfung und eine Prüfdauer von 15 Minuten wird ein Grenzwert von höchstens 20 l/m³ empfohlen (der entsprechende Prüfwert für eine Probe von10-l beträgt 200 ml). Als zusätzliches Kriterium kann ein maximaler Verlust von 40 l/m^3 nach 60 Minuten Filtration definiert werden. Für die Annahmeprüfung wird in der Stabilitätsklasse FW20 ein Filtrationsverlust von 25 l/m³ nach 15 Minuten Filtrationszeit erlaubt.

Abbildung A.8: Prüfmittel zur Bestimmung der Filtratwassermenge von unter Druck stehendem Frischbeton (gemäß ÖVBB-Merkblatt Weiche Betone, 2009)



Frischbetonzusammensetzung

Zur Überprüfung, ob die tatsächliche Zusammensetzung der vorgeschriebenen entspricht, können die Dichte, der Wassergehalt, der Wasserzementwert, der Feinanteil < 0.125mm und der Gehalt (und Form) an grober Gesteinskörnung von einem entsprechend geeigneten Baustofflabor bestimmt werden.

Der Darr-Versuch, bei dem der Wassergehalt des Frischbetons mit entweder mäßig hoher Temperatur im Ofen oder in einer Mikrowelle verdunstet wird, kann auf der Baustelle durchgeführt werden, um den Wassergehalt zu bestimmen (z.B. gemäß AASHTO T 318).

Anhang B – Konzepte für die Anwendung von Zusatzstoffen

Die Festlegung von Mindestzementgehalten für Beton für Tiefgründungen ist oft nicht erforderlich, um die geforderte Festigkeitsklasse zu erreichen, sondern um bestimmte Frischbetoneigenschaften zu erzielen. Zusatzstoffe wie Flugasche und Hüttensandmehl werden häufig verwendet, um einen Teil des Zements zu ersetzen, wodurch wiederum die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, die Konsistenzhaltung und die Stabilität sowie die Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit im Allgemeinen beeinflusst werden.

Drei Konzepte stehen für die Anwendung von (reaktiven) Typ II-Zusatzstoffen (EN 206) zur Verfügung:

1) der k-Wert-Ansatz,
2) das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit und
3) das Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Zement-Zusatzstoff-Kombinationen.

Die Anwendungsregeln dieser drei Ansätze variieren in den unterschiedlichen CEN-Mitgliedstaaten. Für jedes Projekt sollte der Ansatz sorgfältig aus technischer und ökonomischer Sicht betrachtet werden.

k-Wert-Ansatz

Der k-Wert-Ansatz ist ein Konzept mit Vorschriftscharakter. Er basiert auf dem Vergleich der Dauerhaftigkeiten eines Referenzbetons und eines Prüfbetons, in dem der Zement teilweise durch einen Betonzusatzstoff ersetzt wird, dies in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und dem Gehalt an Zusatzstoffen.

Der k-Wert-Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung von Zusatzstoffen vom Typ II:

- indem der „Wasserzementwert“ durch den „Wasser/-(Zement + k × Zusatzstoff)-Wert“ ersetzt wird;
- dabei darf der Anteil an (Zement + k × Zusatzstoff) den für die entsprechende Expositionsklasse erforderlichen Mindestzementgehalt nicht unterschreiten.

Die Anwendungsregeln des k-Wert-Ansatzes auf Flugasche nach EN 450-1, Silikastaub nach EN 13263-1 und Hüttensandmehl nach EN 15167-1 zusammen mit Zement vom Typ CEM I und CEM II/A nach EN 197-1 finden sich in den entsprechenden Abschnitten der EN 206.

Modifizierungen des k-Wert Ansatzes dürfen angewendet werden, wenn deren Eignung nachgewiesen wurde (z.B. höhere k-Werte, erhöhte Anteile von Zusatzstoffen, Verwendung anderer Zusatzstoffe, Kombination von Zusatzstoffen und anderen Zementen).

Für eine detaillierte Beschreibung des gesamten Verfahrens und der Anwendung des k-Wert-Ansatzes wird auf CEN/TR 16639 (2014) verwiesen.

Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (ECPC)

Die Grundsätze des Konzeptes der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit wurden mit EN 206 eingeführt.

Dieses Konzept erlaubt Abweichungen von den Anforderungen an den Mindestzementgehalt und den höchstzulässigen Wasserzementwert, wenn eine Kombination aus einem festgelegten Betonzusatzstoff und festgelegten Zement verwendet wird und deren Herstellwerke und Eigenschaften klar ausgewiesen und dokumentiert sind. Es muss nachgewiesen werden, dass der Beton insbesondere hinsichtlich seines Verhaltens gegenüber Einwirkungen aus der Umgebung und

seiner Dauerhaftigkeit eine gleichwertige Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einem Referenzbeton hat, der den Anforderungen an die maßgebende Expositionsklasse genügt.

Der Referenzzement muss die Anforderungen von EN 197-1 erfüllen und von einem Hersteller stammen, der innerhalb der letzten fünf Jahre am Ort der Anwendung in der gewählten Expositionsklasse in der Praxis tätig war. Der Referenzbeton muss den vor Ort gültigen Vorschriften für die gewählte Expositionsklasse entsprechen.

Die Zusammensetzung für den geplanten Beton muss so gewählt werden, dass unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses und der geplanten Ausführungsmethode die Anforderungen an Frisch- und Festbeton erfüllt werden, einschließlich der an Konsistenz, Dichte, Festigkeit, Dauerhaftigkeit sowie den Korrosionschutz des eingebetteten Stahls.

Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff (EPCC)

Die Grundsätze des „Konzepts der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff“ erlauben eine festgelegte Bandbreite von Kombinationen von einem Zement nach EN 197-1 und einem Zusatzstoff (oder Zusatzstoffen) mit nachgewiesener Eignung, die auf den höchstzulässigen Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt, die für den Beton festgelegt sind, angerechnet werden können.

Der Grundsatz umfasst die folgenden Elemente:

1) Identifizierung einer Zementart, die einer Europäischen Norm entspricht, und die die gleiche oder eine ähnliche Zusammensetzung wie die vorgesehene Kombination aufweist;
2) Bewertung, ob die mit der Kombination hergestellten Betone eine ähnliche Festigkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen wie Betone, die mit der identifizierten Zementart für die maßgebende Expositionsklasse hergestellt wurden;
3) Einführung einer Produktionskontrolle, mit der sichergestellt wird, dass diese Anforderungen an die Betone, die die Kombination enthalten, festgelegt und umgesetzt werden.

In Europa existieren drei Verfahren, die verwendet werden, um das Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Zement-Zusatzstoff-Kombinationen zu bestimmen – das britische, das irische und das portugiesische Verfahren. Diese drei Verfahren wurden unabhängig voneinander entwickelt und weichen hinsichtlich der Steuerung der Kombinationen deutlich voneinander ab. Diese drei Methoden werden umfassend in CEN/TR 16639 (2014) beschrieben.

Anhang C – Verfahren zur Prüfung des fertiggestellten Bauwerks

Die Prüfung fertiggestellter Bauwerke ist für geotechnische Bauwerke nicht verpflichtend, wenn deren Entwurf und Bemessung den anzuwendenden Normen und die Ausführung sowohl Ausführungsnormen als auch der gängigen Praxis entspricht. Prüfungen nach der Fertigstellung sind in letzter Zeit gleichwohl häufiger geworden. Im Allgemeinen werden diese Prüfungen nach den Projektvorgaben durchgeführt. Einige Prüfungen müssen vor der Ausführung der Gründungsarbeiten vorbereitet werden, andere können auch noch durchgeführt werden, wenn ein Verdacht auf Fehlstellen besteht (siehe *Anhang D*).

Sowohl zerstörende als auch zerstörungsfreie Prüfverfahren erfordern Fachwissen für Durchführung und Auswertung. Bautechnische Kenntnis ist für die Prüfungsdurchführung notwendig, während die Interpretation der Ergebnisse in Abstimmung mit dem geotechnischen Ingenieur des Projekts durch einen qualifizierten Ingenieur erfolgen sollte.

In Ergänzung zur Liste der direkten Prüfverfahren, werden die Ultraschallprüfung (Cross-Hole Sonic Logging, CSL) und die thermische Integritätsprüfung (TIP) als zerstörungsfreie Prüfverfahren, beschrieben, die eine detaillierte Planung vor Baubeginn erfordern. CSL wurde bereits bei zahlreichen Bauvorhaben eingesetzt und TIP wird möglicherweise zukünftig wegen der beschriebenen Vorteile öfter angewendet. Weitere Verfahren stehen zu Verfügung und wurden z.B. in der EA Pfähle (2012), ICE SPERW (2017), FHWA GEC (2010) und in Fachliteratur für zerstörungsfreie Prüfungen beschrieben.

Wenn die Prüfung eines fertiggestellten Bauwerks erforderlich ist, sollten zerstörungsfreie Prüfverfahren zerstörenden vorgezogen werden.

Direkte Prüfverfahren

- Bohrkernentnahme aus dem Fundament, um Bauteileigenschaften festzustellen oder die Verhältnisse an der Sohle zu untersuchen. In letzterem Fall kann ein Leerrohr am Bewehrungskorb angebracht und bis in Sohlnähe geführt werden, um die Bohrkerngewinnung zu vereinfachen.
- Kamerainspektion des Elementes und der Sohle, innerhalb eines Bohrloches
- Aushub, um die Oberfläche des Gründungselementes zu untersuchen
- Freilegen eines Pfahles

Ultraschall-Integritätsprüfung (CSL)

Übertragung einer Schallwelle von einem Sender in einem Messrohr innerhalb des Gründungselements zu einem Empfänger, im selben oder einem weiteren Messrohr. Das Prüfverfahren wird in ASTM D6760-14 und NF P94-160-1 beschrieben.

Die Wellenlaufzeit sowie die übertragene Energie werden gemessen und zur Ergebnisbeurteilung verwendet. In den meisten Anwendungen werden deutliche Abweichungen der Laufzeit kombiniert mit reduzierter Energie als Ultraschallanomalien bezeichnet (mögliche Fehlstellen, Abweichungen).

Die Rohre für das Prüfverfahren werden üblicherweise innerhalb des Bewehrungskorbes angeordnet, um das Fließen des Betons nicht zu behindern. CSL-Profile zwischen mehreren Rohrpaaren zu ermitteln ermöglicht Rückschlüsse auf Art, Lage und Ausmaß von möglichen Defekten in der Mitte des Bewehrungskorbes und um die Rohre. Es kann keine Aussage über mögliche Defekte im Bereich der Betondeckung, d.h. zwischen dem Bewehrungskorb und dem anstehenden Boden getroffen werden.

Die Prüfung ist empfindlich gegenüber Abweichungen in der tatsächlichen Schallgeschwindigkeit im Beton und der Lagegenauigkeit der Rohre, weshalb die Interpretation und die Beurteilung der Ergebnisse Fachwissen erfordert und alle verfügbaren Informationen zur Ausführung berücksichtigt werden sollten (Beckhaus, Heinzelmann, 2015).

Es wurde gezeigt, dass die Integrität zwischen Schlitzwandelementen oder zwei Sekundärpfählen (einschließlich des Primärpfahls dazwischen) grundsätzlich untersucht werden kann, wenn Messrohre beiderseits der Fuge(n) installiert sind (Niederleithinger et al, 2010). Das Ergebnis dieser Messung kann jedoch aufgrund der Anwesenheit von Arbeitsfugen zwischen den Elementen schwierig zu interpretieren sein. Dieses Prüfverfahren ist nicht anwendbar, wenn verlorene Abschalelemente verwendet werden, wie zum Beispiel Betonfertigteile oder Stahlbleche.

Thermische Integritätsprüfung

Die thermische Integritätsprüfung (TIP) umfasst die Messung der Wärmeentwicklung des Betons. Die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit und Wärmeentwicklung von jeglichen Einschlüssen verursachen eine Änderung der Temperatur, welche ein bis zwei Tage nach der Betonage gemessen werden kann. Dieses Verfahren wird in der nordamerikanischen Norm ASTM D7949-14 beschrieben. Informationen zur Prüfung mittels Glasfasertechnik sind in ICE SPERW (2017) vorhanden.

Die Temperatur kann mittels Thermistore (temperaturabhängigen Widerständen), Glasfasersensorik oder (seltener) mit in Rohren geführten Temperatursonden innerhalb des Gründungselementes überwacht werden. Diese Systeme werden im Allgemeinen an dem Bewehrungskorb befestigt und messen dadurch die Temperatur im Bereich der Betondeckung eines Gründungselementes. Geistige Eigentumsrechte können bei den unterschiedlichen Systemen gelten.

In den meisten Fällen weist eine fehlende Temperaturzunahme auf eine thermische Anomalie (möglicher Defekt) hin. Temperaturdaten können über die gesamte Höhe des Schafts gewonnen werden, was eine vollständige dreidimensionale Analyse zulässt. Das Verfahren kann den Schaftkern und die Betondeckungszone erfassen und eine Aussage zu Überprofil, den Bodenverhältnissen und die Ausrichtung des Bewehrungskorbes ermöglichen.

Diese Technologie kann auch zur Verfolgung des Betonflusses innerhalb eines Pfahls oder Schlitzes während des Einbringens des Betons im Kontraktorverfahren eingesetzt werden. Hierbei wird die Temperaturdifferenz zwischen der Stützflüssigkeit und dem Beton in Echtzeit überwacht.

Anhang D – Interpretation von Imperfektionen

Imperfektionen in einem Tiefgründungselement, die von der definierten Entwurfsqualität oder der sonst üblichen Unterbrechungsfreiheit des Ortbetonbauteils abweichen, werden als mögliche Fehlstellen betrachtet und üblicherweise näher untersucht.

Imperfektionen sind nicht notwendigerweise Fehlstellen. Zum Beispiel sind Riefen auf der Betonoberfläche, die vom Ziehen des Aushubgerätes stammen, unvermeidlich (siehe *Abbildung D.1*). Solche Riefen sollten nicht als Fehlstellen betrachtet werden, solange sie nicht die im Entwurf geforderte Betondeckung beeinträchtigen.

Abbildung D.1: Beispiele für Pfähle mit Riefen, die die dauerhaftigkeitsrelevante Mindestbetondeckung nicht beeinträchtigen.

Eine gründliche Interpretation der Imperfektionen sollte von einem erfahrenen Spezialisten für geotechnische Arbeiten durchgeführt werden, der dann objektiv abschätzen kann, ob eine Imperfektion eine Fehlstelle oder eine Abweichung ohne schädigenden Einfluss auf die Tragfähigkeit oder die Dauerhaftigkeit darstellt. Die folgenden Abschnitte können bei der Interpretation und Beurteilung von Imperfektionen hilfreich sein.

Die Entstehungsmechanismen von Imperfektionen

Hinsichtlich der Einordnung von Imperfektionen können besondere Merkmale auf die entsprechenden Entstehungsmechanismen hindeuten, obwohl in vielen Fällen Imperfektionen nicht nur eine Ursache haben, weshalb Fachwissen und Erfahrung erforderlich sind:

- Lage von Imperfektionen – Bezug zu enger Bewehrungsführung oder zu Hindernissen in der Betondeckungszone?
- Begrenzung von Imperfektionen – steht die Änderung der Betondeckung in Bezug zum Auftreten?
- Art des Einschlusses – Materialgemisch oder ausschließlich Betonbestandteile?
- Unregelmäßigkeiten während des Betonierens – Weisen die Aufzeichnungen zum Betoneinbau und zur Eintauchtiefe des Kontraktorrohrs auf Probleme hin?
- Unzureichende Verarbeitbarkeitsdauer – Dosierung des Verzögerers entsprechend der festgelegten Aufrechterhaltung der Fließfähigkeit?

- Instabilität des Betons – Vorhandensein einer ausgeprägten Übergangsschicht aus Material auf der Betonoberfläche, Wasserläufer auf der freigelegten Oberfläche, Fehlen von Zuschlag im Beton?

Direkte Überprüfung freigelegter Tiefgründungen

Nach dem Aushub können Abweichungen an der Betonoberfläche visuell beurteilt und zu Dokumentationszwecken fotografiert werden.

Aus vermuteten Imperfektionen können Bohrkernproben entnommen werden, um deren Ausmaß abzuschätzen und den Verbund zwischen Bewehrung und Beton zu überprüfen. Die Kernproben können weiteren Prüfungen oder petrographischen Analysen unterzogen werden, um mehr über die Betonqualität zu erfahren.

Indirekte Überprüfung von Tiefgründungen

Indirekte Überprüfung bezieht sich auf zerstörungsfreie Prüfungen mit Auswertung von Signalen, wie bei der Ultraschallintegritätsprüfung oder der thermischen Integritätsprüfung. Dies erfordert eine detaillierte Planung vor Baubeginn und unter Beteiligung der Ausführenden.

Einordnung von Imperfektionen

Werden Imperfektionen als systematisch erkannt, sollten sie klassifiziert werden. Die meisten Imperfektionen fallen in eine der drei folgenden Kategorien:

Einschlüsse

Einschlüsse bestehen aus in der Gründung eingeschlossenem Material, das nicht dem Referenzbeton entspricht. Es kann sich um ungebundenes Material handeln aus einer Vermischung der Stützflüssigkeit mit Bohrklein und Beton, z.B. aus dem Übergangsbereich, oder um gering zementhaltiges Material aus entmischtem Beton. Zwei Beispiele werden in *Abbildung D.2* gezeigt.

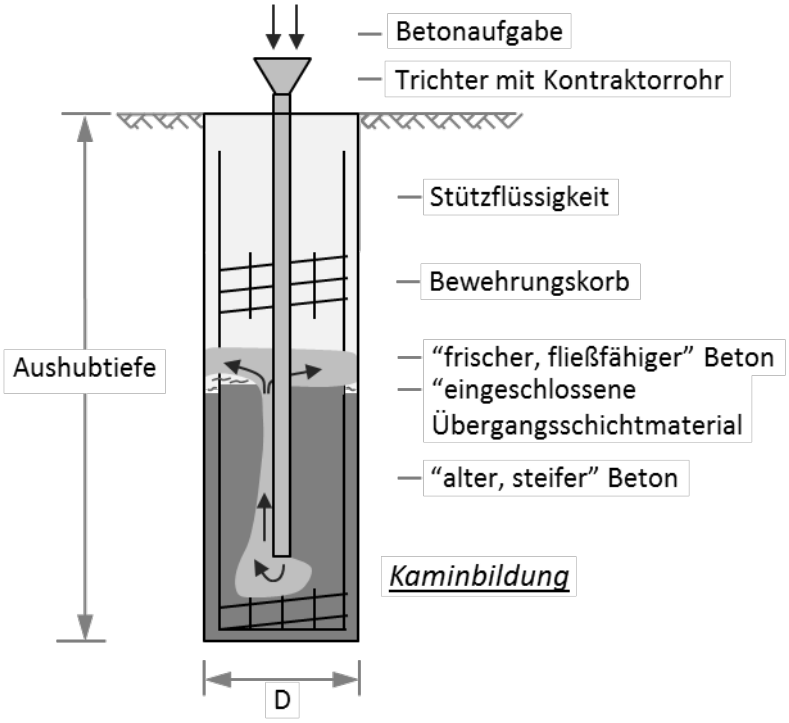
Abbildung D.2: Beispiele für Einschlüsse in einer Schlitzwand und einem Bohrpfahl (Pfahlfoto aus Bild 9.14b, FHWA GEC10)

Einschlüsse werden üblicherweise als hinnehmbar angesehen, wenn diese in Ausmaß und Anzahl begrenzt sind. Nur wenn das Ausmaß dergestalt ist, dass die Tragfähigkeit beeinträchtigt wird oder

große Teile der Betondeckung betroffen sind, was die Dauerhaftigkeit herabsetzt, sollten Einschlüsse als Fehlstellen klassifiziert werden.

Ein irreguläres Fließmuster, wie in *Abbildung D.3* dargestellt, wo der „frische, flüssige Beton“ den „alten, steifen Beton“ (über einen Großteil des Querschnittes wie in Abbildung 16 und 17 dargestellt) nicht verdrängen kann, kann solche Einschlüsse verursachen.

Abbildung D.3: Schema einer Kaminbildung aufgrund eines Verarbeitbarkeitsverlustes des Betons während der Betonage (gemäß Abbildung 9.13, FHWA GEC10), wo eine Übergangsschicht durch überströmenden Beton teilweise eingeschlossen wird.



Zerstörungsfreie Prüfungen können helfen, Einschlüsse zu erkennen (siehe *Anhang C*). Diese Prüfungen erfordern Fachwissen und Erfahrung, mit denen das Ausmaß der Imperfektionen durch weitere Untersuchungen abgeschätzt werden kann.

Blutwasserkanäle

Bei Blutwasserkanälen handelt es sich um eng begrenzte vertikale Bereiche mit gering gebundenem Zuschlag und fehlendem Feinanteil sowie fehlender Zementmatrix, üblicherweise nahe der Pfahl- oder Elementoberfläche. Dieses Phänomen wird durch eine für die tatsächlichen Boden- und Betonierverhältnisse unzureichende Betonstabilität verursacht (niedriger Widerstand gegen Entmischen/Bluten).

Blutwasserkanäle werden üblicherweise nicht als Fehlstllen bezeichnet, wenn diese isoliert und von geringer Dicke sind und somit die Dauerhaftigkeit nicht signifikant verringern (siehe *Abbildung D.4*). Zusätzlich kann Blutwasser entlang vertikaler Einbauten innerhalb des Querschnitts aufsteigen, z. B. an Längsbewehrung, oder innerhalb des Kerns von breiten Elementen.

Abbildung D.4: Beispiele für Blutwasserkanäle auf der Oberfläche eines Pfahls und einer Schlitzwand

Schattenbildung

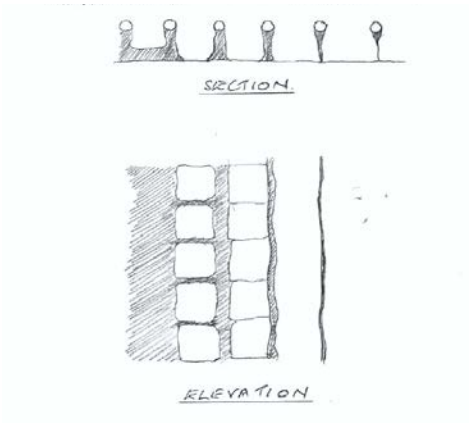
Während leichte Schattenbildung eine vertikale, lineare Erscheinung beschreibt, die primär von der Längsbewehrung ausgeht, weist eine deutliche Schattenbildung ein sich kreuzendes, vertikales und horizontales, lineares Erscheinungsbild auf. Beide Erscheinungsbilder gehen von der Bewehrung aus, wobei Material auf der Außenseite der Bewehrung eingeschlossen wird. Eine leichte Schattenbildung kann zu einem vordefinierten Weg für das Bluten führen, was zu einer Kombination der Effekte führt.

Eine Schattenbildung kann die gesamte Betondeckung bis zur Bewehrung unterbrechen. Da die Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit oder Tragfähigkeit (je nach Ausmaß und Häufigkeit) signifikant sein kann, sollte eine Schattenbildung als ein möglicher Mangel angesehen und näher untersucht werden (siehe *Abbildung D.5* und *D.6*).

Die Bildung von Betonierschatten steht in Zusammenhang mit dem behinderten, horizontalen Fließen von Beton durch die Bewehrung in die Deckungszone kombiniert mit unzureichendem vertikalem Fließen, und daher mit fehlendem freiem Fließen um die Bewehrung. Die auf den Frischbeton wirkende Energiehöhe, seine Fließfähigkeit, Stabilität und Blockierneigung, gemeinsam mit engmaschigen Bewehrungskörben und der Dicke der Betondeckung, können das Ausmaß dieser Imperfektionen beeinflussen. Eine Schattenbildung tritt eher in geringeren Tiefen auf, wo der hydrostatische Druck geringer ist.

Abbildung D.5: Schattenbildung an einem Pfahl (*links*); Schattenbildung an einem Schlitzwandelement (*rechts*)

Abbildung D.6: Schematische Darstellung unterschiedlich ausgeprägter Schattenbildung



Anhang E – Detaillierte Hinweise für Entwurf- und Bemessung

Dieser Anhang sollte gemeinsam mit *Kapitel 2* betrachtet werden und enthält zusätzliche Informationen für die Ausführungsplanung, die Betondeckung und Einzelstützen auf Einzelpfählen im Zusammenhang mit dem Einfluss auf das Fließen des Betons.

Ausführungsplanung
Die Ausführungsplanung von Tiefgründungen sollte nur von erfahrenem Personal ausgeführt werden.

Es muss auf jeden Fall sichergestellt sein, dass die Bewehrung den Betonfluss nicht behindert und die Mindestanforderungen an den lichten Abstand gemäß den gültigen Normen eingehalten werden. Falls eine hohe Bewehrungsdichte erforderlich ist, sollten der höchste verfügbare Stabdurchmesser und der größte Stababstand gewählt werden. Wenn mehrere Bewehrungslagen notwendig sind, muss das Augenmerk auf das Aufrechterhalten eines ausreichenden Fließens des Betons gelegt werden (siehe *Abschnitte 3* und *6*). Es ist häufig der Fall, dass eine sehr dichte Bewehrung ein Hinweis darauf ist, dass die Abmessungen des Tiefgründungselements vergrößert werden müssen.

Zusätzliche Einschränkungen für die Ausbildung von Bewehrungskörben umfassen auch:

- Zusätzliche Bewehrungen für das Heben und Positionieren (z. B. Haltebügel)
- Raum für Abschalelemente, wenn verwendet
- Raum für das Kontraktorrohr
- Instrumentierung mit Messgebern
- Breiten- und Längeneinschränkungen aufgrund von Transporterfordernissen
- das Gewicht des Bewehrungskorbes
- Gegenstände im Bereich der Betondeckung, wie Abstandhalter, Aussparungen und Koppelelemente
- Zuganker und andere eingebettete Gegenstände, wie Öffnungen für Leitungen, usw.

Anforderungen an Bewehrungskörbe sind in *Tabelle E.1, E.2 and E.3* zusammengefasst.

Konstruktive Normen wie EN 1992 legen allgemeine normative Regelungen für die Ausführung, insbesondere für den lichten Abstand und die Betondeckung von tragenden Elementen fest. Diese sind auch für Tiefgründungen d.h. für deren konstruktiven Ausführung gültig. Es werden die Ausführungstoleranzen, wie zum Beispiel die Abmessung des Bewehrungskorbes, berücksichtigt, jedoch können diese nicht alle konkreten Toleranzen für Tiefgründungen abdecken. Daher legen Ausführungsnormen wie z.B. EN 1536 und EN 1538 zusätzliche Anforderungen fest, die manchmal zu widersprüchlichen Auslegungen führen.

Lichter Abstand der Bewehrung

Insbesondere der Bewehrungsabstand beeinflusst die Fähigkeit des Betons in den Bereich der Betondeckung zu fließen und muss für die tatsächlichen Gegebenheiten geeignet sein. Dies ist schwer zu quantifizieren, da es die Berücksichtigung des Abstandes zwischen den horizontalen und vertikalen Bewehrungsstäben, der freien Durchflussweite, der Anordnung mehrlagiger Bewehrung, der Größe des Betonzuschlags und der Rheologie gemeinsam mit Fließweiten und hydrostatischen Drücken erfordert. Querbewehrungen, die durch die Mitte des Bewehrungskorbes geführt werden (z.B. Kupplungen, Verbindungen, Zugstäbe) beeinflussen das Aufsteigen des Betons.

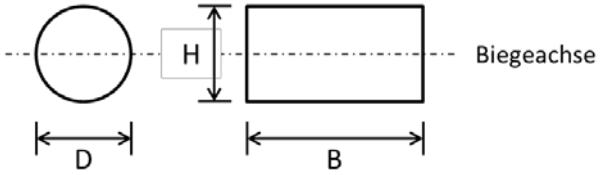
Einigung herrscht, dass der Bewehrungsabstand in Tiefgründungen aufgrund beschwerlicher Ausführungsanforderungen viel größer sein muss als durch konstruktive Normen gefordert wird.

Wie in *Abschnitt 2.2* beschrieben sollte ein minimaler, vertikaler lichter Abstand von 100 mm verpflichtend sein. FHWA GEC10 empfiehlt Werte 5-10-mal des Größtkorndurchmessers für schwierige Einbaubedingungen d.h. sehr große oder sehr tiefe Elemente, mehrere Bewehrungslagen und eine komplexe Geometrie des Bewehrungskorbes. Dies umfasst auch Stoßbereiche oder wo Bewehrungsstäben mittels Verbindungselemente verbunden sind.

Es ist zu hoffen, dass zukünftige Forschung mittels numerischer Simulationen und Validierung mittels Feldversuche behilflich sein können, um eindeutigere Regeln für den geeigneten lichten Abstand festzulegen.

TABELLE E.1: Übliche Anforderungen an die Bewehrung von Bohrpfählen und Schlitzwänden

Mindestbewehrung für Bohrpfähle und Schlitzwände



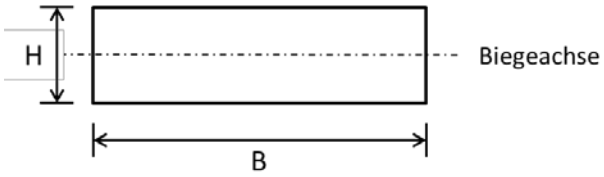
Position	Abschnitt	Wert	Kommentare	
Für Elemente wo die Exzentrizität der Last D/8 für Pfähle, oder H/6 für Schlitzwände nicht übersteigt				
Vertikal	ACI336.3R-14, 4.6, mit Verweis auf ACI318 (siehe ACI318-14, 10.6.1)	1% A_c	Für Elemente unter Druck, die nicht unbewehrt ausgeführt werden können, mit A_C als Nennquerschnitt	
	EN1536:2010+A1, Tabelle 3	≥ 0.5% A_c	$A_c \leq 0.5\ m^2$	mit A_C als Nennquerschnitt des Bohrpfahles.
		≥ 0.0025 m^2	$0.5\ m^2 < A_c \leq 1.0\ m^2$	
		≥ 0.25% A_c	$A_c > 1.0\ m^2$	
Verbindungen, Ringe und Wendelbewehrung	ACI336.3R-14, 4.6 mit Verweis auf ACI318 (siehe ACI318-14, 10.6.1)		ACI318-14, 10.6.2.2 beschreibt die Mindestfläche der Wendelbewehrung.	
	EN1536:2010+A1, Tabelle 4	≥ 6 mm ≥ 1/4 des Höchst-durchmessers der Längsbewehrung	Rechteckige und runde Bügel oder Wendelbewehrung.	
		≥ 5 mm	Stäbe von Baustahlmatten als Querbewehrung.	
Für Elemente wo die Exzentrizität der Last D/8 für Pfähle, oder H/6 für Schlitzwände übersteigt				
Vertikal	EN1992-1-1:2004+A1, 9.3.1	$(f_{cm}/f_{yk})\ A_c$, aber nicht weniger als 0.5% A_c	wo f_{cm} die mittlere Betondruckfestigkeit ist, die als 8 MPa höher wie die charakteristische Festigkeit angenommen werden kann, und f_{yk} die Streckgrenze der Bewehrung ist (diese Ausführungen nehmen an, dass ca. ¼ der Bewehrung die Rissbildung auf der Zugseite kontrolliert)	
Verbindungen, Ringe und Wendelbewehrung	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	Zone mit Stoßbereich für Pfähle $\geq 0.08\ [f_{ck}]^{1/2}/f_{yk}$ Stoßbereich für Schlitzwand $\geq 0.08\ [f_{ck}]^{1/2}/f_{yk}$	wo “s” der Abstand derStöße oder Steigung der Wendel ist, f_{ck} charakteristische Festigkeit des Betons ist (N/mm^2), f_{yk} die Streckgrenze der Bewehrung ist	
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	Vertikale Abstände im Stoßbereich ≤ 0.6 D Vertikale Abstände im Stoßbereich für Barrette ≤ 0.6 H Steigung der Wendel ≤ 0.3 D	(dies setzt voraus, dass die effektive Tiefe ca. 0.8 D für Pfähle oder 0.8 H für Schlitzwände ist und dass die mögliche Versagensfläche die Wendelbewehrung mindestens drei Mal kreuzt)	

TABELLE E.1: Übliche Anforderungen an die Bewehrung von Bohrpfählen und Schlitzwänden (Fort.)

Bewehrungsabstand für Bohrpfähle und Schlitzwände			
Position	**Abschnitt**	**Wert**	**Kommentare**
Horizontaler und vertikaler Abstand der Bewehrung	ACI336.1-01, 3.4.9	≥ 100 mm	inklusive bei Übergreifungsstößen
	ACI336.1-01, 3.4.9	≥ 4 D_{max}	wo D_{max} = Größtkorndurchmesser, inklusive bei Übergreifungsstößen
	EN1536:2010+ A1, 7.5.2.5	≤ 400 mm	so breit wie möglich, aber weniger als 400 mm.
	EN206:2013+A 1, Annex D.2.2	≥ 4 D_{max}	wo D_{max} = Größtkorndurchmesser
	EN1536:2010+ A1, 7.5.2.6	≥ 100 mm	für einzelne oder gebündelte Längsbewehrungsstäbe
	EN1536:2010+ A1, 7.5.2.7	≥ 80 mm	für Übergreifungsstöße, vorausgesetzt, D_G ≤ 20 mm (besonderes Augenmerk muss auf ausreichenden Betonfluss gelegt werden, siehe *Kapitel 3 und 6*).
	EN1536:2010+ A1, 7.5.2.9	≥ 1.5 D_{max} und ≥ 2.0 D_S	für Bewehrungslagen, die radial positioniert werden, wo D_S = Durchmesser der Bewehrung

TABELLE E.2: Übliche Anforderungen an die Bewehrung von Schlitzwänden

Mindestbewehrung für Schlitzwände



Position	Abschnitt	Wert	Kommentare
Vertikal – für Wände wo die Lastexzentrizität H/6 nicht übersteigt	EN1992-1-1:2004+A1, 9.6.2	0.2% A_c	mit A_C als Gesamtfläche des Elements
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	$D_s \geq 12$ mm	mit D_S = Stabdurchmesser.
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	> 3 Stäbe / m	auf jeder Seite des Bewehrungskorbes
Vertikal – für Wände wo die Lastexzentrizität H/6 übersteigt	EN1992-1-1:2004+A1, 9.3.1	Mindestquerschnitt je Seite / Bereich, Länge = 0.26 (f_{cm}/f_{yk}) d, aber nicht weniger als 0.0013 d	wo f_{cm} die mittlere Betondruckfestigkeit ist, die als 8 MPa höher wie die charakteristische Festigkeit angenommen werden kann, und f_{yk} die Streckgrenze der Bewehrung ist, und d die effektive Tiefe zum Schwerpunkt der Zugbewehrung von der Druckseite ausgehend
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	$D_s \geq 12$ mm	mit D_S = Stabdurchmesser.
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	> 3 Stäbe / m	auf jeder Seite des Bewehrungskorbes
Horizontal	EN1992-1-1:2004+A1, 9.6.3	Minimale Gesamtfläche / Bereich Höhe > 0.1% A_c	mit A_C als Gesamtfläche des Elements / Schlitzwandelementhöhe
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.6.3	Minimale Fläche je Seite / Bereich Höhe ≥ 25% A_{sv}	mit A_{SV} als Querschnittsfläche des vertikalen Betonstahls / Schlitzwandelementhöhe
	EN1538:2010+A1		keine konkreten Anforderungen
Through-thickness links (where required for shear strength)	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	minimale Flläche / Bereich einer Wand (bezogen auf Tiefe)	wo f_{cm} die mittlere Betondruckfestigkeit ist, und f_{yk} die Streckgrenze der Bewehrung ist
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	horizontaler Abstand ≤ 0.75 d, aber nicht mehr als 600 mm	und d die effektive Tiefe zum Schwerpunkt der Zugbewehrung von der Druckseite ausgehend
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	vertikaler Abstand ≤ 0.75 d	

TABELLE E.2: Übliche Anforderungen an die Bewehrung von Schlitzwänden (Forts.)

BEWEHRUNGSABSTAND FÜR SCHLITZWÄNDE			
POSITION	**ABSCHNITT**	**WERT**	**KOMMENTARE**
Abstand der vertikalen Stäbe	EN206:2013+A1, Annex D.2.2	≥ 4 D_{max}	wo D_{max} = Größtkorndurchmesser
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.2	≥ 100 mm	für Einzelstäbe oder Stabgruppen, parallel zur Wandung
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.3	≥ 80 mm	für Übergreifungsstöße, vorausgesetzt, D_G ≤ 20 mm (besonderes Augenmerk muss auf ausreichenden Betonfluss gelegt werden, siehe *Kapitel 3* und *6*).
Vertikaler Abstand der horizontalen Bewehrung	EN1538:2010+A1, 7.5.4.2	≥ 200 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.4.3	≥ 150 mm	wo notwendig, vorausgesetzt D_{max} ≤ 20mm, und wo D_{max} = Größtkorndurchmesser
Horizontaler Abstand der horizontalen Bewehrung	EN1538:2010+A1, 7.5.4.4	≥ 150 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.4.5	≥ 200 mm	empfohlen
Horizontaler Abstand der anschließenden Bewehrungskörbe	EN1538:2010+A1, 7.5.5.1	≥ 200 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.5.2	≥ 400 mm	empfohlen
Horizontaler Abstand der Bewehrungskörbe und Fugen inkl. Fugendichtungsband	EN1538:2010+A1, 7.5.5.3	≥ 100 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.5.4	≥ 200 mm	empfohlen

TABELLE E.3: Übliche Anforderungen an Verbund, Verankerungen, Übergreifungsstöße und Rissweiten

VERBUND, VERANKERUNGEN (VERANKERUNGSLÄNGEN) UND STÖSSE (ÜBERGREIFUNGS-LÄNGE) FÜR BOHRPFÄHLE UND SCHLITZWÄNDE		
POSITION	**ABSCHNITT**	**KOMMENTAR**
Verankerungen	ACI318-14, 25.4.2 ACI318-14, 25.4.9	Zugbewehrung Druckbewehrung
Übergreifungslänge	ACI318-14, 25.5.2 ACI318-14, 25.5.5 ACI318-14, 25.6 ACI318-14, 10.7.5.2	Zugbewehrung Druckbewehrung Zusätzliche Festlegungen für Bündelbewehrungen. Zusätzliche Festlegungen für Stützen, von denen angenommen, wird, dass sie auch für Bohrpfähle gelten.
Verbundfestigkeit	EN1992-1-1:2004+A1, 8.4.2	Falls keine Stützflüssigkeit verwendet wurde, können die Verbundbedingungen für vertikale und horizontale Stäbe üblicherweise als “gut“ klassifiziert werden. Fachexpertise (z. B. Jones Holt 2004) sollte für den Einfluss von Stützflüssigkeiten auf den Verbund eingeholt werden.
Verankerungslänge	EN1992-1-1:2004+A1, 8.4.4	Anmerkung: Falls die Betondeckung den Stabdurchmesser übersteigt, was üblicherweise der Fall ist, darf der Faktor α_2 mit kleiner als 1 angenommen werden.
Übergreifungslänge	EN1992-1-1:2004+A1, 8.7.3	Anmerkung: Falls die Betondeckung den Stabdurchmesser übersteigt, was üblicherweise der Fall ist, darf der Faktor α2 mit kleiner als eins angenommen werden. Der Faktor α6 beträgt jedoch üblicherweise 1,5, was allen Übergreifungsstößen an einer Stelle entspricht. Die Verwendung von Spanngliedkopplungen/Muffen sollte in Betracht gezogen werden, besonders für größe Stäbe, die gemäß EN 1992-1-1, 8.8 einen Durchmesser über 32 mm aufweisen (40 mm gemäß dem britischen NA).
RISSWEITEN		
POSITION	**ABSCHNITT**	**KOMMENTAR**
Berechnung	ACI336.3R-14	keine Anforderungen

der Rissweiten	EN1992-1-1:2004+A1,7.3.4	Anmerkung: Die Kommentare unter Tabelle NA.4 im britischen NA zu EN1992-1-1 enthalten Hinweise für Fälle, in denen die Betondeckung deutlich höher ist als für die Dauerhaftigkeit erforderlich ist und keine Anforderungen an das Erscheinungsbild gestellt werden, z. B. Bauteile, die gegen den Boden betoniert werden. Unter diesen Bedingungen ist es zweckmäßig, die Rissweite an der Betondeckung, die für die Dauerhaftigkeit erforderlich ist, zu bestimmen und zu verifizieren, dass die relevante höchste Rissweite nicht überschritten wird. Dies kann durch die Annahme, dass die Rissweite linear von null bei der Bewehrung zum berechneten Wert an der Oberfläche zunimmt.

Betondeckung

Aus konstruktiver Sicht ist die Betondeckung sowohl für die Dauerhaftigkeit als auch für den Widerstand gegen die von der Bewehrung ausgehende Spaltzugkräfte erforderlich.

Für die Ausführung von Tiefgründungen im Kontraktorverfahren, ist die Festlegung einer ausreichenden Betondeckung, wie in den Ausführungsnormen (EN 1536 und EN 1538, ACI 301) beschrieben, wesentlich, damit der Beton durch die Betondeckungszone fließen kann und ein dichter, dauerhafter Beton in diesem Bereich entsteht.

Der größte der einzelnen Mindestwerte für die Betondeckung, die sich aus Anforderungen zu Verbund, Dauerhaftigkeit und Ausführung ergeben, sollte um einen Zuschlag für Herstellungstoleranzen erhöht werden, wie in *Abschnitt 2.3* und nachstehend dargestellt.

Nominelle Betondeckung = der größte Mindestwert der Betondeckung für Dauerhaftigkeit, Verbund, Ausführung + Zuschlag für Herstellungstoleranzen

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{mit} \quad c_{min} \geq \max \begin{bmatrix} c_{min,Bemessung} \\ c_{min,Ausführung} \end{bmatrix}$$

Die allgemeine Empfehlung dieses Leitfadens ist, dass die Mindestbetondeckung für die Ausführung 75 mm sein sollte d.h. eine Mindestbetondeckung von 50 mm plus einer Toleranz von 25 mm.

Die nominelle Mindestbetondeckung sollte in den Fällen wo die Mindestbetondeckung infolge Bemessung, wie z.B. wie in EN 1992 gegeben, 50 mm überschreitet (wie oben beschrieben), um den entsprechenden Betrag erhöht werden.

Hinweis 1: Die Mindestbetondeckung sollte erhöht werden, wenn die Bedingungen für das Fließen des Betons als kritisch angesehen werden. Manche Beispiele sind in EN 1536 gegeben, wie z.B., wenn ein Größtkorn von 32 mm eingesetzt wird oder wenn die Betonviskosität erhöht wird (z. B. wenn Zement um einen erheblichen Teil größer 5% durch Silikastaub ersetzt wird) oder in weichen Böden ohne temporäre Verrohrung.

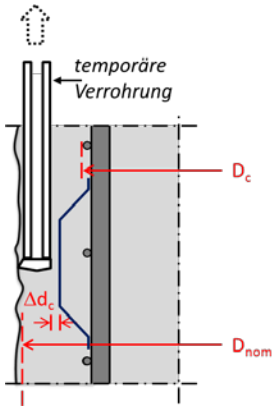
Hinweis 2: FHWA GEC 10 (2010) empfiehlt eine höhere Betondeckung für Bohrpfähle mit großem Durchmesser d.h. 75 mm Deckung für Schaftdurchmesser ≤1 m, 100 mm Deckung für Durchmesser größer 1 m aber ≤ 1.5 m, and 150 mm Deckung für Durchmesser größer 1.5 m.

Hinweis 3: EN 1536 erlaubt, dass die Mindestbetondeckung für die Ausführung auf 40 mm reduziert werden kann, wenn eine permanente Verrohrung verwendet wird. Es wird empfohlen, dass die Mindestbetondeckung eines Bewehrungskorbes in Richtung der Innenseite von temporärer und permanenter Verrohrung nicht weniger als 50 mm beträgt. Ein Vorhaltemaß für die Ausführung ist in diesem Fall nicht notwendig, jedoch ist ein zusätzliches Vorhaltemaß für die Einbringung des Bewehrungskorbes weiterhin verpflichtend, siehe Abbildung E.1.

Hinweis 4: der erforderliche Abstand zwischen Bewehrungskörben und Fugen oder Schalung sind unabhängig von der Betondeckung. Gemäß EN 1538:2010+A1, 7.5.5.3 und 7.5.5.4 sollten diese Abstände ≥ 100 mm bzw. ≤ 200 mm betragen.

Hinweis 5: Viele Planer zögern, eine große Betondeckung anzusetzen, da sie befürchten, dass die Rissweiten auf der Oberfläche zu groß werden. Das sollte kein Problem sein, da Rissweiten mit der Mindestbetondeckung berechnet werden und der außerhalb liegende Beton als überschüssig angesehen wird (siehe CIRIA Guide C760 (2017) und ACI 350).

Abbildung E.1: Betondeckung in verrohrt hergestellten Bohrpfählen (ergänzend zu *Abbildung 3*).



Einzelstützen auf Einzelpfähle

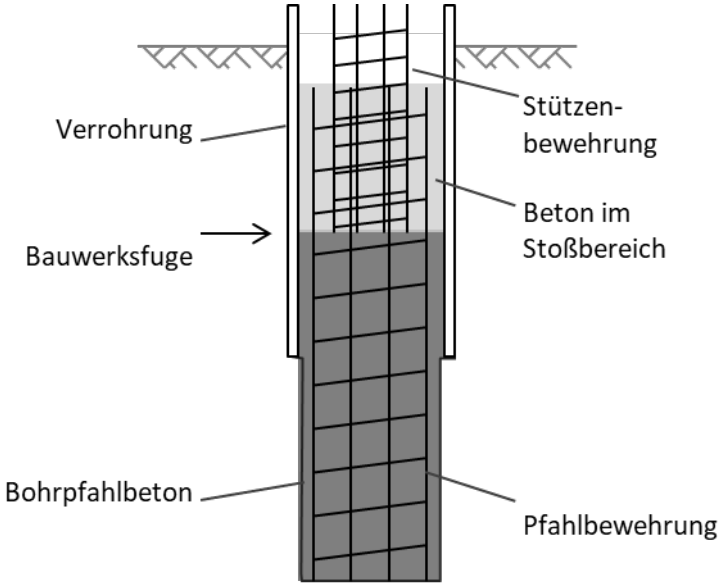
Die Ausfphrungsplanungfür den Anschluss von Bewehrungskörben kann eine Herausforderung für die Herstellbarkeit von Bohrpfählen darstellen, wenn ein Einzelpfahl verwendet wird, um eine Einzelstütze zu tragen und der Übergang zwischen der Stützen- und der Pfahlbewehrung nahe dem Pfahlkopf liegt. Dieser Detailbereich kann besonders eng werden, wenn eine kontaktlose Überlappung verwendet wird und die Stützenbewehrung einen eigenen Bewehrungskorb innerhalb der Pfahlbewehrung, wie in *Abbildung E.2*. dargestellt, umfasst. Ankerbolzenverbindungen von Sendetürmen, Signalpfosten oder ähnlichen Bauwerken können zu ähnlichen Engpässen führen. Es ist besonders schwierig für Kontraktorbeton durch zwei Bewehrungskörbe zu fließen, ohne den Beton am Pfahlkopf zu verunreinigen.

Die effektivste Lösung für dieses Problem ist es, eine Bauwerksfuge unterhalb der Überlappung vorzusehen, damit der Pfahlkopf gekappt und der Beton im Bereich der Überlappung trocken, wie bei konventionellem Beton, eingebracht werden kann. Diese Vorgehensweise erfordert üblicherweise, dass eine Verrohrung an der Oberfläche verwendet wird, um einen gesicherten Pfahlaushub über der Bauwerksfuge zu ermöglichen. Die Oberfläche der Bauwerksfuge erfordert meist eine Vorbereitung durch Entfernen der Übergangsschicht, von Blutwasser oder verschmutztem Beton vor dem Betonieren des Überlappungsbereiches. In manchen Fällen ist es möglich Stützflüssigkeiten und verunreinigten Beton aus dem Überlappungsbereich zu entfernen und die Überlappung herzustellen, während der Beton verarbeitbar bleibt.

In manchen Fällen, wo die Überlappung im Pfahl relativ kurz ist (z.B. bis zu 2 m), kann es möglich sein den inneren Bewehrungskorb in den frischen Beton einzubringen, nachdem der Betoneinbau vollendet worden ist. Obwohl dieser Ansatz mit einem großen Bewehrungskorb umständlich sein würde, könnte es mit einem kurzen Bewehrungsabschnitt, der oberhalb verlängert wird als oder mit einer Ankerschraube verwendet wird, handlich sein.

Dieses Prozedere kann Einschränkungen haben, wenn Ausrichtungstoleranzen aufgrund von Schwierigkeiten bei präziser Platzierung eng sind und wegen des kurzen Zeitfensters in dem der Beton ausreichend verarbeitbar bleibt, um die Arbeiten abzuschließen.

Abbildung E.2: Anschlussdetail für einen Bohrpfahl, der eine Einzelstütze trägt



Anhang F – Zusammenfassung an Faktoren und Auswirkung auf den Betonfluss

Eine Auswahl an wichtigen Faktoren und deren mögliche Auswirkung auf die Fließeigenschaften sowie die Qualität des Betons in Tiefgründungselementen ist in *Tabelle F.1* gegeben. Diese Tabelle spiegelt das gemeinsame Verständnis der Arbeitsgruppe wider. Die Liste ist nicht vollständig, ermöglicht jedoch einen breiten Überblick über den Inhalt dieses Leitfadens.

Tabelle F.1: Unterschiedliche Faktoren und deren mögliche Auswirkung auf die Fließeigenschaften sowie die Qualität des Betons innerhalb einer Tiefgründung

Parameter	Empfehlung	Auswirkung (en)	Siehe
Lichter Abstand der Bewehrung	Maximieren	Geringerer Blockierwiderstand und geringerer Widerstand zum Hindurchfließen des Betons. Minimierung des Risikos der Bildung von Einflüssen und unzureichende Deckung der Bewehrung durch Beton.	2.2, Anh. E 6.8
Mehrlagige Bewehrung	Vermeiden	Geringerer Widerstand zum Hindurchfließen des Betons.	2.2
Betondeckung	Erhöhen	Verringerung des Risikos der Schattenbildung und kann als Sicherheitspuffer für einer unvermeidbaren Filterkuchendicke dienen.	2.2
Betonrheologie und Verarbeitbarkeit	Mittlere/geringe Fließgrenze mittlere Viskosität	Hohe Fließgrenze und hohe Viskosität führen zu geringer Fließfähigkeit. Zu geringe Fließgrenze kann eine Entmischung verursachen. Eine hohe Variation der Eigenschaften kann zur Bildung von unregelmäßigen Fließmustern führen	3.2 4.3 6.7
Thixotropie	Kontrollieren	Eine übermäßige Zunahme der Fließgrenze des Betons während einer Ruhephase kann zur Bildung von unregelmäßigen Fließmustern führen. Im eingebauten Beton führt derselbe Effekt zu geringerer Filtration, Bluten oder Entmischung	3.2
Betonstabilität	Kontrollieren	Übermäßige Filtration, Bluten oder Entmischung kann zu unregelmäßigen Fließmustern und Anomalien führen	3.3
Verwendung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln	Optimieren	Verbessert die Rheologie. Kann die Robustheit und Stabilität der Betonmischung (in Abhängigkeit von der Dosierung und Interaktionen) beeinflussen.	4.4
Setzfließmaß	Gemäß Tabelle 1	Höhere Werte führen zu einer besseren Verarbeitbarkeit aber geringere Stabilität.	5.1
Setzfließgeschwindigkeit	Gemäß Tabelle 1	Geringere Werte führen zu einem erhöhten Fließwiderstand und können die Betonagedauer erhöhen	5.1
Eignungsprüfung	Laborversuche in der Entwurfs-phase	Untersuchung einer geeigneten Mischung mit den vorhandenen Ausgangsstoffen, die die projektspezifischen Anforderungen an den Beton erfüllen. Anweisungen zur Festlegung von	5.2

	Wiederholen	Konformitätsgrenzwerte ermöglichen. Eignungsnachweis mit sich ändernden Ausgangsstoffen oder Dosierungen.	
Konformitäts-prüfung	Feldversuche zum Beginn der Ausführung Mischungsentwurf des Betons anpassen	Nachweis, dass die im Entwurf geforderten Eigenschaften durch den tatsächlichen Beton des Lieferanten erreicht werden können. Erlaubt Konformität mit der geforderten Leistung durch kleine Änderungen im Mischungsentwurf; ansonsten Wiederholung der Eignungsprüfung.	5.2
Annahmeprüfung	regelmäßig während der Ausführung	Regelmäßiger Nachweis der Übereinstimmung mit den Anforderungen und Einhaltung der Qualitätssicherungskriterien.	5.2
Beibehaltung der Verarbeitbarkeit	Kontrollieren	Ermöglichung eines verarbeitbaren Betons zum Ende der entworfenen Betonagedauer. Eine übermäßige Zunahme der Fließgrenze sollte vermieden werden, da diese zu einer unzureichenden Verarbeitbarkeit führen kann. Eine längere Verarbeitbarkeit kann zu einem erhöhten Bluten oder zu einer Entmischung führen.	5.3
(Gesamt) Betonagedauer	Verspätungen minimieren	Geringere Änderung der Betonrheologie.	5.3
Bohrklein in der Sohle	Begrenzen	Bohrklein in der Sohle kann zur Vermischung mit der 1. Charge an Beton und zur Bildung von Einflüssen beitragen.	6.2
Dichte der Stützflüssigkeit	Begrenzen	Geringerer Widerstand gegenüber Fließen des Betons.	6.2
Sauberkeit der Stützflüssigkeit	Maximieren	Mehr Bodenpartikel in der Stützflüssigkeit können zu einer dickeren Übergangsschicht auf dem Beton führen.	6.2
Kontraktorrohroberfläche	Glatt und sauber	Begrenzt die Reibung zwischen Beton und Kontraktorrohr und somit auch den Fließwiderstand.	6.3
Kontraktorrohrabstand	Begrenzen	Längere Fließwege können Probleme nahe dem Bewehrungskorb, in der Betondeckung oder nahe den Fugen verursachen	6.4 6.8
Eintauchtiefe des Kontraktorrohr	Minimieren	Schnellerer Betonfluss Frühere Beendigung der Bewegung des (eingebauten) Betons unterhalb des Kontraktorrohrs. Vermindertes Risiko der dynamischen Entmischung	6.6
Variation der Verarbeitbarkeit einzelner Chargen	Begrenzen	Hohe Variationen können zu einer Änderung der Fließmechanismen und zur Bildung unregelmäßiger Fließmuster führen.	9

Literatur

ACI

ACI CT-13	ACI Concrete Terminology - An ACI Standard	2013
ACI 211.1-91	Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009). ACI.	1991
ACI 301-16	Specifications for Structural Concrete. ACI.	2016
ACI 304R-00	Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete (Reapproved 2009). ACI.	2000
ACI 318-14	Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI.	2014
ACI 336.1-01	Specifications for the Construction of Drilled Piers. ACI.	2001
ACI 336.3R-14	Report on Design and Construction of Drilled Piers. ACI.	2014
ACI 350-06	Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures. ACI	2006
ACI 543R-12	Guide to Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles. ACI.	2012

ASTM International

ASTM C143-15	Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM Standard.	2015
ASTM C232-14	Standard Test Method for Bleeding of Concrete. ASTM Standard.	2014
ASTM C1602-12	Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. ASTM Standard.	2012
ASTM C1610-14	Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique. ASTM Standard.	2014
ASTM C1611-14	Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM Standard.	2014
ASTM C1712-17	Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test. ASTM Standard	2017
ASTM D6760-16	Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing. ASTM Standard.	2016
ASTM D7949-14	Standard Test Method for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations. ASTM Standard.	2014

CEN

EN 196-3:2016	Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Europäische Norm. CEN.	2016
EN 197-1:2011	Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Europäische Norm. CEN.	2011
EN 206:2013 + A1:2016	Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Europäische Norm. CEN.	2016
EN 450-1:2012	Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien. Europäische Norm. CEN.	2012

EN 480-4:2005	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren – Teil 4: Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten). Europäische Norm. CEN.	2005
EN 1008:2002	Zugabewasser für Beton - Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton. Europäische Norm. CEN.	2002
EN 1536:2010 + A1:2015	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle. Europäische Norm. CEN.	2015
EN 1538:2010 + A1:2015	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Schlitzwände. Europäische Norm. CEN.	2015
EN 1992-1-1:2004 + A1:2014	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Europäische Norm. CEN.	2014
EN 1997-1:2004 + A1:2013	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Europäische Norm. CEN.	2013
EN 12350-1 to -12	Prüfung von Frischbeton – Teil 1 bis 12. Europäische Norm. CEN.	2009 to 2010
-1	Probenahme und Prüfgeräte	2009
-2	Setzmaß	2009
-5	Ausbreitmaß	2009
-8	Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch	2010
-11	Selbstverdichtender Beton - Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch	2010
EN 13263-1:2005 + A1:2009	Silikastaub für Beton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien. Europäische Norm. CEN.	2009
EN 15167-1:2006	Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien. Europäische Norm. CEN.	2006
EN ISO 9001:2015	Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Europäische und Internationale Norm. CEN + ISO.	2015
EN ISO 10414-1	Erdöl- und Erdgasindustrie – Feldprüfung von Bohrflüssigkeiten – Teil 1: Flüssigkeiten auf Wasserbasis (ISO 10414-1:2008). Europäische und Internationale Norm. CEN + ISO.	2008
CEN/TR 16639	k-Wert-Ansatz, Prinzipien des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit und Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff. Technischer Bericht. CEN.	2014

Andere Normen, Richtlinien und Empfehlungen

AASHTO R81	Standard Practice for Static Segregation of Hardened Self-Consolidating Concrete (SCC) Cylinders	2017
AASHTO T318	Standard Method of Test for Water Content of Freshly Mixed Concrete Using Microwave Oven Drying	2015
API RP 13B-1	Field testing for Water-Based Drilling Fluids. API Recommended Practice 13B-1. 4th edition, 3-2009	2009

Z17, CIA	Tremie Concrete for Deep Foundations. Recommended Practice, Concrete Institute of Australia. Australia	2012
CIRIA C580	Embedded retaining walls – guidance for economic design. CIRIA. London. UK	2003
CIRIA C760	Guidance on embedded retaining wall design. CIRIA, London. UK	2017
DAfStb Richtlinie SVB	Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). DAfStb. Beuth. Berlin. Germany	2003
DIN 1045-2	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1	2001
DFI Publication 74	Industry practice standards and DFI practice guidelines for structural slurry walls. Deep Foundations Institute.	2005
FHWA GEC10	Drilled Shafts: Construction Ablaufs and LRFD Design Methods. Geotechnical Engineering Circular No. 10. Publication No. FHWA-NHI-10-016. National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.	2010
Guide technique LCPC	Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en parois composites – Guide technique LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chausssées - Paris Cedex	2003
ICE SPERW	The ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. 3rd edition. ICE. UK	2017
Support Fluid Guide	Guide to Support Fluids for Deep Foundations. 1st Edition. EFFC and DFI.	2018/19
New Zealand Geotechnical Society Inc.	Guideline for Hand Held Shear Vane Test.	2001
Merkblatt Weiche Betone	Weiche Betone. Betone mit Konsistenz ≥ F 59. Inklusive ergänzender Klarstellungen. ÖBV. Dezember 2009, Wien. Austria [en: Guideline on Soft Concrete. Concrete with consistency equal or greater than a 59 cm flow (tested acc. to EN 12350-5)]	2009
NF P94-I60-1	Auscultation d'un élement de foundation, partie 1: Méthode par transparence. AFNOR. Paris. France	2000
NF XP P 18-468	Béton – Essai pour béton frai - Ressuage. AFNOR. Paris. France	2016
EA Pfähle	2. Ausgabe 2012. DGGT (Ed.). Wiley, Berlin. Germany	2012
Richtlinie Bohrpfähle	Richtlinie Bohrpfähle. ÖBV. 2013, Wien, Austria [en: Guideline on Bored Piles]	2013
Richtlinie Dichte Schlitzwände	Richtlinie Dichte Schlitzwände. ÖBV. 2013, Wien. Austria (Guidelines on Waterproof Cut-Off Walls)	2013

Other Publications

Aitcin, P.-C., Flatt, R.J. (Ed.)	Science and Technology of Concrete Admixtures. Woodhead Publishing.	2015
Azzi A. et al	Relationship between mix designs and bleeding for SF-SCC applied to diaphragm walls. International Concrete Sustainability Conference, SCC-2016, Washington, US,	2016

	pp. 1129-1139	
Beckhaus K., Heinzelmann H.	Cross-Hole Sonic Integrity Testing for Bored Piles – A Challenge. Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering. NDT-CE 2015, Berlin	2015
Böhle B., Pulsfort, M.	Untersuchungen zum Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei der Herstellung von Bohrpfählen. 33. Baugrundtagung, 2014. DGGT, Berlin, Germany [en: Fluid and casing supported Execution of bored Piles and their effects on Concrete Flow Behaviour]	2014
Brown D., Schindler A.	High Performance Concrete and Drilled Shaft Construction. Contemporary Issues in Deep Foundation - Conference Proceedings. GeoDenver 2007, USA	2007
Dairou M.M. et al	Influence of concrete structural buildup at rest on the penetration of reinforcement cages in piles. International Journal of Structural Analysis and Design, IJSAD, Vol. 2, Issue 1, pp. 77-82	2015
Deese G.G., Mullins, G	Factors Affecting Concrete Flow in Drilled Shaft Construction. GEO3 – GEO Construction Quality Assurance/Quality Control Conference. Dallas, Texas	2005
Domone P.L.J., Jefferis S.A.	Structural Grouts, Chapter 2. Blackie Academics and Professional.	1994
Dreux G., Festa J.	Nouveau Guide du Béton et de ses constituants. Eyrolles, Paris, France [en: New Guide on concrete and its constituents)	1998
Feys D.	Why using an air-entrainer to increase workability is not a great idea for deep foundations. Proceedings of the DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Rome, Italy	2018
Harrison T A.	Control and conformity of water to binder ratio in fresh concrete. Concrete Society Technical Report 76	2017
Jones A.E.K., Holt D.A.	Design of laps for deformed bars in concrete under bentonite and polymer drilling fluids. Structural Engineer, vol. 82. London, UK	2004
Kosmatka S., et al	Design and Control of Concrete Mixtures. 14th Edition, Portland Cement Association. Skokie, IL, USA	2003
Kraenkel T., Gehlen C.	Rheology and Workability Testing of Deep Foundation Concrete in Europe and the US. Research Report No. 20-F-0107, Chair of Materials Science and Testing, Centre for Building Materials, Technical University of Munich	2018
Li C., et al	Numerical simulation of fresh concrete flow in deep foundations, Engineering Computations	2018
Littlechild B., Plumbridge G.	Effects of construction technique on the behaviour of plain bored cast in situ piles constructed under drilling slurry, Proc of 7th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, Vienna, DFI, p1.6.1 to 1.6.8	1998
Loukili A. (Ed.)	Les bétons auto-plaçants. Hermès Science, Lavoisier. Paris. France (en: self-consolidating concrete)	2011
Lubach A.	Bentonite cavities in diaphragm walls. Case studies, process decomposition, scenario analysis and laboratory experiments	2010
Massoussi N., et al	The heterogeneous nature of bleeding in cement pastes. Cement and Concrete Research 95, pp. 108-116.	2017

Neville A.M., Brooks, J.J.	Concrete Technology. Second Edition, Pearson Education Ltd., UK	2010
Newman J., Choo, B.S.	Advanced Concrete Technology, Processes (Vol 4), Chapter 12, Elsevier	2003
Niederleithinger E., et al	Crosshole sonic logging of secant pile walls a feasibility study. Proceedings of the 23rd SAGEEP Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Environmental and Engineering Geophysical Society. Keystone, Colorado, USA	2010
Poletto R.J., Tamaro G.J.	Repairs of diaphragm walls, lessons learned. Proceedings of the 36th Annual Conference on Deep Foundations. DFI, Boston, USA	2011
Puller M.	Deep Excavations: A Practical Manual (2nd Edition), Thomas Telford Publishing Ltd, London, UK	2003
Roussel N. (Ed.)	Understanding the Rheology of Concrete. Woodhead Publishing Ltd., UK	2012
Roussel N., Cussigh F.	Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. Cement and Concrete Research 38, pp. 624–632	2008
Roussel N., Gram A. (Eds.)	Simulation of Fresh Concrete Flow. State-of-the Art Report of the RILEM Technical Committee 222-SCF	2014
Rupnow T., Icenogle P.	Comparison of Conventional and Self-Consolidating Concrete for Drilled Shaft Construction. Final Report 533. Louisiana Transportation Research Center	2015
Seitz J.M., Schmidt H.-G.	Bohrpfähle. Ernst & Sohn, Berlin, Germany (Bored Piles)	2000
Sellountou A., et al	Thermal Integrity Profiling: A Recent Technological Advancement in Integrity Evaluation of Concrete Piles. Proceedings from the First International Conference, Seminar on Deep Foundations: Santa Cruz , Bolivia	2013
Spruit R.	To detect anomalies in diaphragm walls. PhD thesis, Civil Engineering and Geosciences, TU Delft. PhD thesis, Technical University Delft, Civil Engineering and Geosciences. IPSKAMP drukkers, the Netherlands	2015
Thorp A., et al	Recent Experience of Tremie Concrete Properties and Testing. DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement Rome, 5-8 June	2018
Torrenti J.M.	Du béton frais au béton durci. Techniques de l'Ingénieur, website (www.techniques-ingenieur.fr), France	2009
Turner M.J.	R144 Integrity testing in piling practice. Report. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), UK	1997
Tuthill, L., et al	Observations in Testing and Use of Water-Reducing Retarders. ASTM International.	1960
Wallevik O.H.	Rheology – A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete. Proceedings of the 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, Iceland.	2003
Yao S. X., Bittner R. B.	Underwater concrete in drilled shafts: the key issues and case histories. Contemporary Issue in Deep Foundation - Conference Proceedings, Geo-Denver 2007, USA	2007