

Nachhaltige Dichtwände im Spezialtiefbau unter Ausnutzung plastischer Verformungseigenschaften

K. Beckhaus¹⁾

¹⁾ BAUER Spezialtiefbau GmbH

DOI: <https://doi.org/10.3217/vea6c-qb659>

1 Einleitung

Aktuell finalisiert eine gemeinsame Arbeitsgruppe der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) Empfehlungen für ein neues Bemessungskonzept für nachhaltige Dichtwände aus „hochverformbaren Dichtwandmassen“. Der Fokus liegt im Wesentlichen auf einer höheren Ausnutzung des visko-elastischen und auch plastischen Verformungsvermögens zementgebundener Dichtwandbaustoffe geringer Festigkeit. Diese erlaubt einen geringeren erforderlichen Zementgehalt und bietet damit einen nachhaltigen Vorteil, da der äquivalente CO₂-Fußabdruck signifikant geringer ist. Im Vergleich zum klassischen Bemessungsverfahren soll eine geringere Festigkeit erlaubt werden. Diese soll so hoch sein, dass sie die Erosionssicherheit gewährleistet, mit einem möglichst geringen Verformungsmodul aber gleichzeitig Verformung erlaubt, ohne dass die zulässigen Druck- und Zugspannungen überschritten werden und dann Risse entstehen. Im Beitrag wird vorgestellt, wie dieses hohe Verformungsvermögen in der Bemessung angewendet werden kann und damit wirtschaftlichere und ressourcenschonendere Dichtwände geplant werden können.

2 Anwendungsbereich

In Vorbereitung auf die Auswirkungen von Klimaveränderungen sind insbesondere Betreiber von Stauhaltungsbauwerken in der Pflicht, vorsorgliche Maßnahmen an bestehenden Anlagen in Angriff zu nehmen oder auch neue Anlagen nach dem heutigen Stand der Technik zu planen.

In der Wasserwirtschaft werden folglich auch an die vertikalen Damm-, Deich- und Untergrundabdichtungen (im Folgenden: „Dichtwände“) sehr hohe Anforderungen gestellt; vor allem an deren Dichtigkeit über die gesamte Nutzungsdauer der wasserbaulichen Anlage unter den gegebenen und zukünftig zu erwartenden Einwirkungen, siehe Abb. 1.

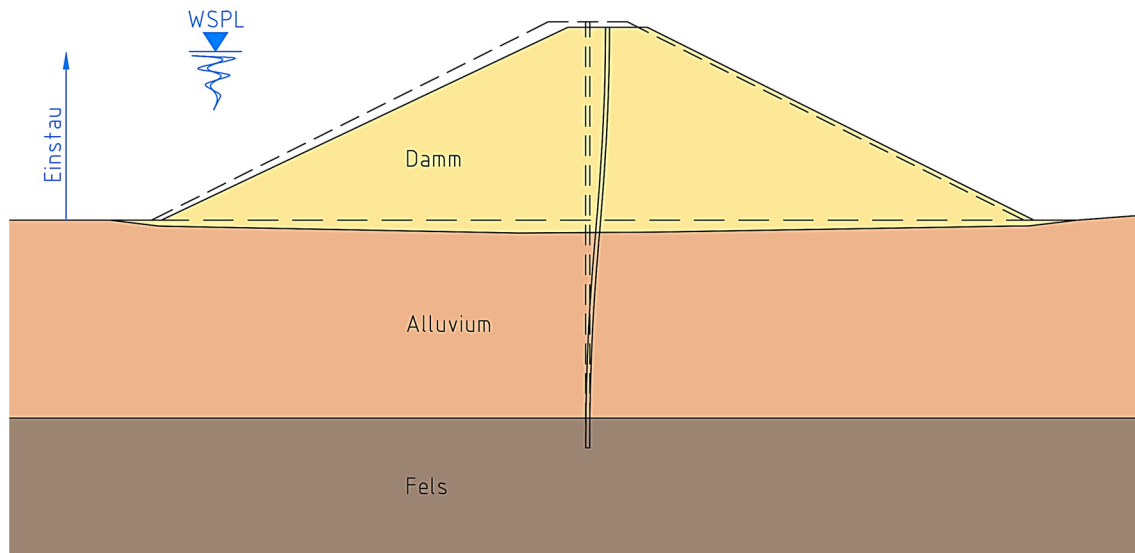


Abb. 1: Zeichnerische Darstellung einer typischen Situation für die Anwendung hochverformbarer Dichtungselemente (Schnitt)

Im Rahmen der Planung sind unter anderem die baustofftechnischen Eigenschaften der Dichtwandmassen festzulegen. Werden als vertikale Dichtungselemente hydraulisch gebundene Dichtwandmassen eingesetzt, wie sie etwa im Merkblatt DWA-M 512-1 (2012) „Dichtungssysteme im Wasserbau, Erdbauwerke“ als „selbsterhärtende Suspension“ beschrieben sind, sind damit auch spezifische technische Abhängigkeiten der Verformungseigenschaften und der hydraulischen Parameter von der baustofflichen Zusammensetzung verbunden. Nach derzeitigen Erfahrungen fließt das visko-elastische und sogar ausgeprägt plastische Verformungsvermögen von hydraulischen Dichtwandmassen niedriger Festigkeit nicht ausreichend in die Bewertung ein, sondern wird neben der Anforderung an eine maximal zulässige Wasserdurchlässigkeit oft zusätzlich nur eine Mindestfestigkeit zur Sicherstellung eines ausreichenden Erosionswiderstands gefordert. Die „vertragliche“ Forderung einer Mindestfestigkeit führt in der Konsequenz – in Verbindung mit einem (zu) großzügig gewählten Vorhaltemaß in der Ausführung – aber zu einer zu hohen Festigkeit und damit zwangsläufig einhergehend zu einem weniger duktilen Bauteilverhalten. Für die o.g. prinzipiell erforderliche Dichtigkeit – unter den üblichen Nutzungsbedingungen – muss aber die Dichtwandmasse gerade auch hochverformbar sein.

Die Herausforderung wurde darin erkannt, objektive Kriterien für hochverformbare Dichtwandmassen zu etablieren, die schon in der Planungsphase und Ausschreibung definiert werden.

Die Lösungsstrategie kann zumindest teilweise anhand eines Praxisbeispiels aus Bayern erarbeitet werden. Am Sylvensteindamm (Wasserwirtschaftsamt Weilheim) waren Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich, für die u.a. eine tiefe Dichtwand erstellt wurde. Im Zuge der Ausschreibung und Festlegung der Qualitätskriterien wurde neben anderen Kenngrößen *kein* Mindestwert, sondern ein „Zielwert“ für die einaxiale Druckfestigkeit der Dichtwandmasse festgelegt. Gleichzeitig wurden für die wesentlichen Eigenschaften Durchlässigkeit und Verformbarkeit direkte Grenzwerte definiert.

Die Relevanz der baustofflichen Parameter auf die Funktion der geplanten Dichtwand muss präzisiert werden. Entsprechend muss eine hohe Verformbarkeit einer Dichtwandmasse in der Bemessung von Dichtwänden berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollte auch der Einfluss solcher hochverformbaren Dichtwandmassen auf die bauliche Nachhaltigkeit im Sinne des Klimaschutzes aufgezeigt werden. Konkret sind durch eine Reduzierung des Zementgehalts (bei im Mittel geringerer Festigkeitsanforderung) Einsparungen bei der Emission von Treibhausgasen fast in gleicher Größenordnung zu erwarten.

Die Lösung wird in einer Formulierung von konkreten Bemessungsregeln und Empfehlungen für die Planung und Ausführung gesehen, die im Wesentlichen auf die Baustofftechnologie und deren Bedeutung für die Robustheit bzw. Resilienz von Dichtwänden und damit für die effektive Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken aufbauen. Dafür hat die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) mit der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) eine gemeinsame Arbeitsgruppe „Hochverformbare Dichtwandmassen“ (Nr.: WW 6.6) eingerichtet. Die neuen Empfehlungen werden sich auf zementgebundene Dichtwandmassen unterschiedlicher Zusammensetzung beziehen und sind als Ergänzung zum bestehenden Merkblatt DWA-M 512-1 (2012) zu verstehen. Der Stand der Bearbeitung wird hier in wesentlichen Punkten vorgestellt und die Autoren als Mitglieder der Arbeitsgruppe freuen sich auf eine fachtechnische Diskussion, Kritik und Anregungen.

3 Hinweise zur Bemessung

3.1 Anforderungen an Dichtungselemente

Innen- und Untergrundabdichtungen in Erdbauwerken müssen verschiedene Anforderungen erfüllen:

- **Durchlässigkeit**

Die Dichtwandmasse muss ausreichend dicht sein, damit die Dichtungsanforderungen an das Dichtungselement bzw. das Bauwerk erfüllt werden. Konkret ist die Permittivität (Ψ) des Dichtungselements der maßgebliche Parameter. Beispielsweise kann eine 1,0 m dicke Schlitzwand bei größerer Durchlässigkeit ($k = 10^{-8}$ m/s) die gleiche Permittivität aufweisen wie eine 0,1 m dünne Schmalwand mit einer Durchlässigkeit von $k = 10^{-9}$ m/s.

- **Erosionsstabilität**

Die Erosionsstabilität der Dichtwandmasse bestimmt die Dauerhaftigkeit des Dichtungselements.

Bei feststoffarmen Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer Dichte von $\rho \leq 1,3$ t/m³ wird eine Betrachtung der Erosionsstabilität im Einzelfall empfohlen.

Bei feststoffreichen Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer Dichte von $\rho > 1,3$ t/m³ wird eine einaxiale Druckfestigkeit von mindestens 0,3 MPa zur Erzielung eines erosionsstabilen Dichtungselements ($i \leq 50$) als ausreichend angesehen. Bei höheren hydraulischen Gradienten werden Einzelfallprüfungen angeregt, vgl. Kap. 6.2.1.2 in DWA-M 512-1 (2012).

Bei Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer hohen Dichte von $\rho > 1,6$ t/m³ können aufgrund der Praxiserfahrungen hydraulische Gradienten von $i = 100$ (dauerhaft) bis $i = 200$ (temporär) zugelassen werden, vgl. Kap. 6.2.7.6 in DWA-M 512-1 (2012).

- **Verformbarkeit**

Die Spannungs-Stauchungs-Beziehung und hier vor allem die Bruchstauchung bestimmt die Verformbarkeit einer Dichtwandmasse. Die Bruchstauchung muss ausreichend hoch sein, um die zu erwartenden Verformungen des Dichtungselements schadfrei aufnehmen zu können. Eine hohe Verformbarkeit wird in der Regel gleichzeitig durch einen geringen Verformungsmodul beschrieben, der als Materialkenngröße in numerischen Berechnungen eingesetzt wird.

Sind die Verformungen im zu dichtenden Erdbauwerk erheblich, werden durch steife Bauteile „Spannungen angezogen“. Im Bereich von kritischen Verformungspunkten kommt es dann sehr schnell zu einer Überschreitung der zulässigen Spannungen im Dichtungselement. Solche kritischen Verformungspunkte können beispielsweise an Felseinbindungen liegen. Bei der Planung von Dichtungs-elementen sind also hohe Verformbarkeiten des Dichtungselements anzustreben, um eine Überbeanspruchung der Dichtwandmasse zu vermeiden.

Der elastische Verformungsmodul E einer Dichtwandmasse korreliert weitestgehend linear mit der Festigkeit, so dass es beim Entwurf des Dichtungselements nach klassischer elastischer Theorie zu einem

Zielkonflikt hinsichtlich der notwendigen Verformbarkeit kommen kann, wenn sich ein hoher E-Modul aus einer (zu) hohen Festigkeitsanforderung ergibt und damit die rechnerisch resultierenden Spannungen dann größer als die Festigkeit sind.

Das hochverformbare Dichtungselement übernimmt planmäßig keine Tragwirkung und verformt sich mit seiner Umgebung.

- **Festigkeit**

Die Festigkeit der Dichtwandmasse muss ausreichend hoch sein, i.d.R. um hydraulische Einwirkungen zu beherrschen (vgl. Erosionsstabilität), und ausreichend klein sein, um die o.g. Verformbarkeit zu gewährleisten.

Die Festigkeit wird in der Regel im weggesteuerten einaxialen Druckversuch in Anlehnung an DIN 18136 (oder nach DIN EN ISO 17892-7) ermittelt.

Häufig wird an die Dichtwandmasse eine Festigkeitsanforderung gestellt, die irrtümlich darauf beruht, dass dem Dichtungselement eine Tragfunktion im Erdbauwerk oder Untergrund zugeordnet wird, die tatsächlich nicht vom Dichtungselement übernommen wird oder werden muss. Betrachtet man einen Erddamm oder einen Deich, wird man feststellen, dass – außer im Fall von statisch wirk-samen Dichtungen – eine schadlose „Mitverformung“ des Dichtungselementes mit den Verformungen des Erdbauwerks gewünscht ist und große konstruktive Vorteile mit sich bringen kann.

- **Beständigkeit**

Die dauerhafte Funktionstüchtigkeit eines Dichtungselements ist dann gegeben, wenn die auftretenden Verformungen aufgenommen werden können, ohne dabei die geforderte dauerhafte Dichtwirkung zu verlieren. Dabei sind auch wiederholt auftretende, gegebenenfalls wechselnde Verformungen zu beachten.

Die erhärtete Dichtwandmasse muss insbesondere erosionsstabil sein und beständig gegenüber witterungsbedingten, biologischen und chemischen Einwirkungen.

3.2 „Klassisches“ Bemessungsverfahren

Verformungen in Dichtungselementen im Wasserbau können planmäßig aus Setzungen des umgebenden Baugrunds oder Dammkörpers sowie aus betrieblichen Beanspruchungen (Stauspiegelveränderungen, Verkehrs- und Nutzlasten) entstehen. Daraus ergeben sich Beanspruchungen, die Bemessungsgrundlage für die Planung hochverformbarer Dichtungselemente sind.

In vielen Fällen können die o.g. Beanspruchungen planmäßig durch das elastische Verformungsvermögen der Dichtwandmasse aufgenommen werden. Für statische Nachweise wird im Allgemeinen der in DIN 18136 beschriebene

„Modul des einaxialen Druckversuchs“ (E_u) herangezogen, entsprechende der Wendepunkt tangente im Druckspannungs-Stauchungsdiagramm, siehe Abb. 2.

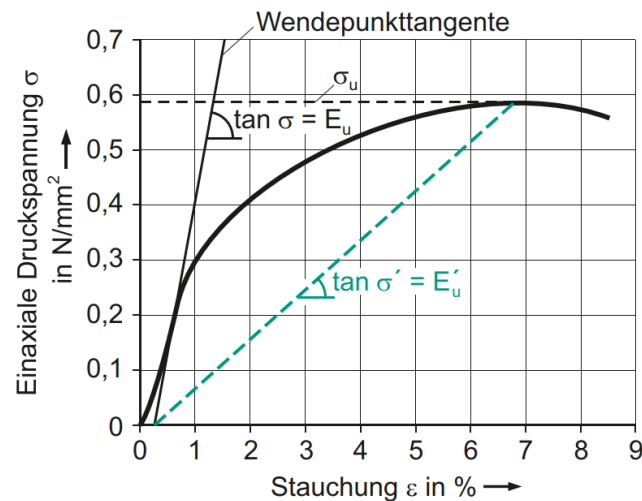


Abb. 2: Spannungs-Stauchungsdiagramm (qualitativ)

Wegen der weitgehend proportionalen Abhängigkeit von Spannungen und Stauchungen im elastischen Bereich ($E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$) steigt mit der aufgezwungenen Verformung gleichermaßen die resultierende Druckspannung, die bei entsprechend begrenzter Stauchung deutlich unterhalb der Druckfestigkeit bleibt.

Eine Biegebeanspruchung ist i.d.R. nur durch eine „Überdrückung“ von sonst resultierenden Biegezugspannungen nachweisbar.

Bei differenzierten Nachweisen mit Hauptzugspannungen können in Anlehnung an DIN 4093 (vgl. Abbildung 2.1 aus DIN 4093:2015, Abschnitt 4.4.4 (3)) vereinfachend Zugspannungen bis zu 5% der dem Entwurf zugrunde gelegten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit $f_{m,k}$ zugelassen werden, ohne eine Rissbildung annehmen zu müssen. Bei höheren Zugspannungen ist sinngemäß anzunehmen, dass die Wand aufreißen kann. In diesem Fall wird empfohlen, den Nachweis der hydraulischen und mechanischen Funktionstüchtigkeit am ungerissenen Restquerschnitt zu führen.

3.3 Bemessungskonzept für hochverformbare Dichtwände

3.3.1 Abgrenzung zum klassischen Bemessungsverfahren

Die wesentlichen Einwirkungen auf Dichtwände sind Verformungen aus dem System Dichtelement und umgebender Baugrund, Dammmaterial oder Bauwerk. Grundlage der Bemessung ist eine Berechnung der Spannungen und Verformungen im Bauwerk, ggf. mit entsprechenden Tragwiderstandsbedingungen nach DIN 19700. Deren Ergebnisse sind die Eingangswerte für die

Bemessung der Dichtwand und zeigen die Integrität der gesamten Konstruktion. Aufgrund der häufig komplexen Randbedingungen an Dämmen und Deichen bieten sich Berechnungen nach der Finite Element Methode (FEM) an.

Aus den Verformungen werden Beanspruchungen als Spannungen oder Spannungsänderungen in der Dichtwand induziert, die bei einer elastischen Betrachtung direkt mit der Steifigkeit der Dichtwand korrelieren. Um die Spannungsänderungen aus Verformungen möglichst gering zu halten, soll die Dichtwand in der Regel einen möglichst geringen Verformungsmodul aufweisen und damit die Verformungen des Gesamtsystems nicht wesentlich beeinflussen.

Gegenüber dem klassischen Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung ausschließlich elastischer Verformungen wird zur Berücksichtigung der Eigenschaften hochverformbarer Dichtungselemente die Duktilität, hier die Verformbarkeit über den elastischen Bereich hinaus, planmäßig bis zur Bruchstauchung ε_u genutzt.

Als wesentliche Bemessungsgröße für die FEM-Berechnung wird dafür ein reduzierter Verformungsmodul E_u^* eingeführt. E_u^* ergibt sich aus dem Tangens der Sekante zwischen dem Nullpunkt der im elastischen Bereich gebildeten Wendepunkt-Tangente (zur Bestimmung von E_u) und dem Hochpunkt der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem verformungsgesteuerten Druckversuch (bei q_u , s. Abb. 2). Für die FEM-Berechnungen können Erfahrungswerte herangezogen werden, die auf der sicheren Seite liegend die maximal zu erwartenden Verformungen ergeben. Entsprechend sind für die Bemessung niedrige Verformungsmodule für die Dichtwandmasse anzusetzen.

Als Ergebnis der Berechnung ergibt sich eine maßgebende charakteristische Stauchung $\varepsilon_{k,DWM}$ im Dichtungselement. Für den Nachweis einer verträglichen Verformbarkeit muss die Bruchstauchung der Dichtwandmasse ε_u größer als $\varepsilon_{k,DWM}$ sein.

3.3.2 Baustofftechnische Charakterisierung hochverformbarer Dichtwandmassen

Hochverformbare Dichtwandmassen zeichnen sich gegenüber spröderen Baustoffen durch ihr ausgeprägtes plastisches Verformungsvermögen aus. Damit die Materialsteifigkeit dieser hochverformbaren Baustoffe bei der Berechnung realitätsnah erfasst werden kann, darf sich die der Materialsteifigkeit, abweichend von den konventionellen Berechnungs- und Bemessungsverfahren, nicht auf die Betrachtung eines linear-elastischen Bereichs beschränken. Das plastische Spannungs-Stauchungsverhalten ist bei dem Bemessungskonzept Hochverformbarer Dichtwandmassen miteinzubeziehen. Durch eine Reduzierung des Verformungsmoduls von E_u auf

E_u^* , infolge zugelassener Plastifizierung des Dichtungselements, werden Spannungen im Material bei aufgeprägter Verformung verringert.

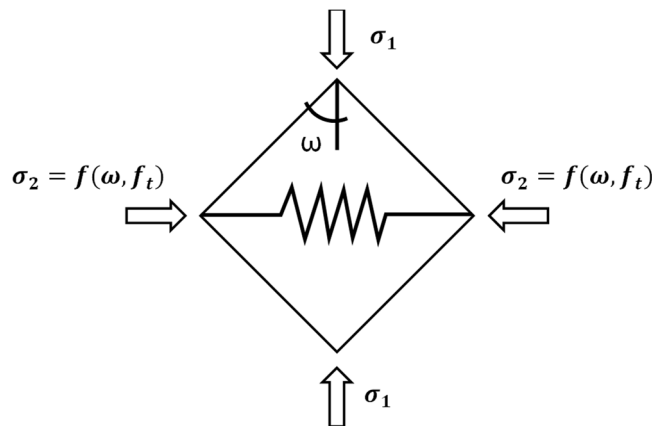


Abb. 3: Element des Modells der inneren Struktur

Die in Abb. 3 dargestellten Größen und Parameter seien:

σ_1 bzw. $\sigma_{2/3}$	Hauptspannungen	[Pa]
ω	Winkel der inneren Struktur	[°]
f_t	Innere Zugfestigkeit des Materials	[Pa]

Das Last-Verformungsverhalten wird im Folgenden über das „*Modell der inneren Struktur*“ (vgl. Abbildung 3) für einen druckbeanspruchten Körper beschrieben. Das Modell ermöglicht über die Definition der beiden Parameter ‚Winkel der inneren Struktur‘ und ‚Innere Zugfestigkeit‘ das Hauptspannungsverhältnis in einem zementgebundenen Material zu beschreiben. Der „*Vorschlag zur Beschreibung des einaxialen Druckverhaltens von hochverformbaren Dichtwandmassen im Modell der inneren Struktur*“ wird ausführlicher im Beitrag von Ramler & Quarg-Vonscheidt in der geotechnik (2024) vorgestellt.

Ein plastisches Materialverhalten lässt sich demnach auf ein entsprechend großes Potenzial der Strukturänderung zurückführen und durch geeignete Materialparameter beschreiben. Spröde Materialien besitzen i. A. kein nennenswertes Änderungspotenzial, die innere Struktur wird, wie z. B. bei Betonen, von einer steifen Zementmatrix bestimmt. Nach vollständiger Mobilisierung der inneren Zugfestigkeit ist keine weitere Lastaufbringung möglich, der Probekörper versagt damit spontan und ohne weitere Vorankündigung. Hat das untersuchte Material hingegen ein entsprechendes Änderungspotential (wie eine hochverformbare Dichtwandmasse), orientiert sich die Lastweiterleitung im Material zunehmend in Belastungsrichtung und erhöht die Belastbarkeit der inneren Struktur des Materials.

Für die Ausnutzung eines plastischen Übergangsbereiches bei hochverformbaren Dichtwandmassen muss sichergestellt sein, dass die

Dichtwirkung erhalten bleibt. Dafür darf es nach dem oben gezeigten Modell der inneren Struktur nicht zu einer Überschreitung der „inneren Zugfestigkeit“ kommen, die wiederum bis zum Erreichen der Druckfestigkeit q_u nicht überschritten wird.

3.3.3 Festlegungen für die Druckfestigkeit und die Steifigkeit der Dichtwandmasse

Ziel des vorgeschlagenen Bemessungskonzepts ist es, die Materialanforderungen für eine Dichtwand festzulegen. Aus der Bemessung des Gesamtbauwerks ergeben sich Verformungen, die die Verformung der Dichtwand vorgeben, und für die Funktionstüchtigkeit der Dichtwand ist der maximale Dehnungszustand in der Wand maßgebend. Dieses charakteristische Verformungsbild kann beispielsweise mit der Finiten-Element-Methode (FEM) berechnet werden.

Der für die Bemessung zu verwendende charakteristische Wert $\varepsilon_{k,DWM}$ ist die maximale Stauchung oder ggf. Dehnung aus allen untersuchten Lastfällen. Weiterer Eingangswert ist die Zieldruckfestigkeit des Dichtwandbaustoffs. Die Basis für die Festlegung ist die erforderliche Mindestdruckfestigkeit q_{erf} der Dichtwand, die sich unabhängig von der mechanischen Beanspruchung in der Regel aus geohydraulischen Anforderungen (z.B. Erosion) ergibt. Das zu wählende Vorhaltemaß V zur Ermittlung der Zieldruckfestigkeit ist über die zu erwartenden Streuungen baustoffabhängig. Für eine Ersteinschätzung soll das Vorhaltemaß zu 50% von q_{erf} , jedoch mindestens zu 0,2 MPa gewählt werden können:

$$q_{ziel} = \max [1,5 q_{erf}; q_{erf} + 0,2 \text{ MPa}] \quad (1)$$

Für die Festlegung des Zielwerts der Verformbarkeit $\varepsilon_{u,Ziel}$ ist die charakteristische Stauchung $\varepsilon_{k,DWM}$ mit einem Teilsicherheitsbeiwert zu erhöhen.

$$\varepsilon_{u,Ziel} \geq \gamma_{DWM} \times \varepsilon_{d,DWM} = \gamma_{DWM} \times \gamma_G \times \varepsilon_{k,DWM} \quad (2)$$

mit γ_G = Teilsicherheitsbeiwert auf Beanspruchungen = 1,35 (BS-P), vgl. DIN 1054.

mit γ_{DWM} = Teilsicherheitsbeiwert für die Dichtwandmasse

Die Größe des Teilsicherheitsbeiwerts für die Dichtwandmasse soll die Streuungen in Bezug auf die Zusammensetzung des Materials und auf die Herstellung berücksichtigen. Da hier lediglich Nachweise der Gebrauchstauglichkeit behandelt werden, ist es ausreichend, realistische baupraktische Erfahrungswerte für γ_{DWM} anzusetzen. Als Anhaltswert kann für werksmäßig hergestellte Dichtwandmassen ohne zu erwartende Einmischung von Boden ein Wert von 1,1 angegeben werden, bei Bodenmischverfahren je

nach Heterogenität der zu erwartenden Dichtwandmasse Werte von bis zu 1,5 und darüber hinaus.

Für die Güteprüfung muss für alle Proben gezeigt werden, dass die erforderliche Druckfestigkeit und die erforderliche Bruchdehnung nicht unterschritten werden:

$$q_k \geq q_{\text{erf}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{u,k} \geq \varepsilon_{d,DWM} \quad (4)$$

3.3.4 Berücksichtigung von Zugspannungen

Für die Bemessung des Gesamtbauwerks ist eine „angemessene“ Verformbarkeit der Dichtwand anzunehmen, definiert durch den charakteristischen Verformungsmodul $E_{u,k}^*$. Damit ergeben sich charakteristische Spannungen in der Dichtwand, $\sigma_{k,DWM}$.

Als erste Näherung wird empfohlen, beim Auftreten von Zugspannungen nachzuweisen, dass dieser Bereich auf maximal 20% des Dichtwandquerschnitts beschränkt ist. Gleichzeitig ist für den verbleibenden Dichtwandquerschnitt von mindestens 80% die geohydraulische Sicherheit nachzuweisen.

4 Hochverformbare Dichtwandmassen

4.1 Allgemeines

Die folgenden Dichtwandmassen können bei entsprechender Zusammensetzung eine hohe Verformbarkeit, d.h. wesentliche nutzbare plastische Verformungsanteile über den elastischen Bereich hinaus, erreichen. Sie können in überschnittenen Bohrpfahlwänden, Schlitzwänden und auch in Wänden aus sich übergreifenden Bodenmischelementen eingesetzt werden. Diese Bauarten sind in den Ausführungsnormen DIN EN 1536, DIN EN 1538 und DIN EN 14679 geregelt.

- (1) Dichtwandmasse aus selbsterhärtender Suspension, auch als „Einphasendichtwandmasse“ bekannt.
- (2) Dichtwandmasse aus plastischem Erdbeton, auch „Plastic Concrete“ oder „Tonbeton“ bekannt.
- (3) Dichtwandmasse mittels tiefreichender Bodenvermörtelung hergestellt, auch als „Bodenmörtel“ bezeichnet.

Welche Art Dichtwandmasse für ein konkretes Projekt zum Einsatz kommt, hängt wesentlich auch von der zum Einsatz kommenden Bauart zusammen. Sehr tiefe Dichtwände erfordern z.B. ein Zweiphasenverfahren, so dass aus obiger Auswahl nur eine Dichtwandmasse aus plastischem Beton in Frage kommt.

Für alle o.g. Baustoffe werden für den Anwendungsbereich als hochverformbare Dichtwandmassen Zielfestigkeiten im folgenden Bereich und mit einer maximalen Durchlässigkeit vorgeschlagen, die abhängig von verfügbaren Baustoffen und anderen Randbedingungen projektspezifisch zu überprüfen bzw. anzupassen sind:

- $q_u = 0,5 \text{ bis } 2,5 \text{ MPa}$
- $k \leq 10^{-8} \text{ m/s}$

4.2 Dichtwandmasse aus selbsterhärtender Suspension

Bei Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension, im Anwendungsbereich von Schlitzwänden auch als „Einphasendichtwandmasse (EDW)“ bekannt, dienen als Stützflüssigkeit während des Aushubs und bilden, zusammen mit Feinanteilen aus dem natürlichen Boden, das endgültige erhärtete Dichtwandbaustoff. Hierdurch ist das Verarbeitungsfenster wie auch die Dichtwandtiefe begrenzt.

Bei einer EDW-Masse handelt es sich um eine Suspension, die Zement, Wasser und zusätzliche Stoffe (z.B. Bentonit oder anderes Tonmineral) als Stabilisator enthält. Zudem können ebenfalls weitere Zusatzstoffe und Zusatzmittel enthalten sein. Gesteinskörnungen werden in der Regel nicht zugegeben. Häufig werden auch Fertigtrockenmischungen verwendet, die herstellerseitig im Werk gemischt werden auf der Baustelle nur noch mit Wasser angemischt werden müssen.

4.3 Dichtwandmasse aus plastischem Beton (Plastic Concrete)

Dichtwandmassen aus plastischem Beton (auch Plastic Concrete oder Tonbeton genannt) werden üblicherweise in einem Betonmischwerk hergestellt und im Zwei-Phasen-Verfahren bzw. Kontraktorverfahren in einem zuvor ausgehobenen Schlitz eingebaut.

Plastic Concrete besteht hierbei aus Zement, Wasser und Bentonit (analog einer EDW-Masse) und einem hohen Anteil an Gesteinskörnung (Sand und Feinkies). Zusatzmittel sowie Zusatzstoffe können ebenfalls zugegeben werden. Aufgrund der Zusammensetzung ähnelt Plastic Concrete am ehesten einem Normalbeton nach EN 206, besitzt aber einen deutlich höheren w/z-Wert sowie niedrigere Zementgehalte.

Die Betonrezeptur wird hierbei an die Anforderungen an Festigkeit, Verformbarkeit und Dichtigkeit angepasst und im Rahmen der Erstprüfung überprüft. Durch den kontrollierten Einbau im Zwei-Phasen-Verfahren (Kontraktorverfahren) werden die mechanischen Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmasse im Wesentlichen durch die Betonrezeptur bestimmt.

Weitere Informationen zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie zum Mischungsentwurf von Plastic Concrete können [Alós Shepherd et al, 2020] entnommen werden.

4.4 Dichtwandmasse aus tiefreichender Bodenvermörtelung

Dichtwandmasse aus tiefreichender Bodenvermörtelung entsteht durch das mechanische Zerlegen durch rotierende Mischwerkzeuge und das Vermischen mit Zementsuspension oder Zement, ohne die Stützung des seitlich anstehenden Bodens aufzuheben. Diese Dichtwandmasse kann aufgrund ihrer Zusammensetzung vereinfacht auch als Bodenmörtel bezeichnet werden.

Zur Steuerung der Eigenschaften im frischen und erhärteten Zustand können Bentonit oder anderes Tonmineral, weitere Zusatzstoffe und (chemische) Zusatzmittel zugegeben werden. Die Art und Menge des verbleibenden Bodens sowie auch dessen natürlicher Wassergehalt bestimmen die mechanischen Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmasse wesentlich mit.

Bodenmörtel als Dichtwandmasse kann bzgl. seiner technischen Eigenschaften zwischen EDW und Plastic Concrete eingeordnet werden. Ist der eingemischte natürliche Boden z.B. ein Kiessand, sind Eigenschaften nahe am Plastic Concrete zu erreichen. Je feinkörniger der eingemischte Boden, desto näher sind die erzielbaren Eigenschaften an denen einer EDW.

5 Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeit von Bauwerken und verwendeten Bauprodukten steht mehr und mehr im Fokus, spätestens seitdem die Weltgemeinschaft 2015 die Agenda 2030 verabschiedet hat. Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung sind politische Zielsetzungen der Vereinten Nationen, die weltweit der Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene dienen sollen [Nachhaltigkeitspolitik der Bundesrepublik Deutschland]. Per Definition ist die Nachhaltigkeit damit nicht auf den Klimaschutz oder den Schutz natürlicher Ressourcen beschränkt.

In Bezug auf dieses Merkblatt und die Erstellung von Dichtwänden aus hochverformbaren Dichtwandbaustoffen soll aber im Fokus stehen, die Belastung für die Umwelt durch Auswahl der Ausgangsstoffe und die

Mischungszusammensetzung so weit zu reduzieren, wie es technisch möglich ist, um die Funktion der Dichtwand zu gewährleisten. Das in Abschnitt 2.3 vorgeschlagene Konzept für die Bemessung hochverformbarer Dichtwände führt gegenüber der „klassischen Bemessung“ insbesondere zu einer Reduzierung des Zementgehalts und damit in Summe zu einer Reduzierung der Emission klimaschädlicher Gase für die Erfüllung der gestellten Bauaufgabe.

Durch die Verwendung des Bodens als Baustoff im „Bodenmörtel“ wird neben der Reduktion des Zementgehalts darüber hinaus das Potenzial der Reduktion der Transporte genutzt, u.a. für die Abfuhr von Aushub und die Anlieferung von Zement. Eine besondere Herausforderung stellt die im Vergleich zu werksmäßig hergestellten Dichtwandbaustoffen größere zu erwartende Streuung der Materialeigenschaften von Bodenmischmörtel dar. Um nicht neu in den Zielkonflikt einer geringen erforderlichen Festigkeit für eine hohe Verformbarkeit zu geraten, muss die Qualitätssicherung projektspezifisch angenähert werden.

Der relevante ökologische Fußabdruck, der für die Planung, die Erstellung und den Erhalt einer Dichtwand entsteht, kann berechnet werden. Um die Reduzierung der Umweltbelastung durch Verwendung und Ausnutzung eines hochverformbaren Dichtwandbaustoffs in Zahlen sichtbar zu machen, können sich Vergleichsberechnungen auf die Bauphase beschränken. Und wenn sonst keine wesentlichen Änderungen in der Zusammensetzung des Dichtwandbaustoffs oder im Bauablauf zu erwarten sind, reicht für die Beurteilung des Effekts zu wissen, um welchen Anteil der Zement reduziert ist.

Abb. 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Vergleichsberechnung für die Herstellung einer Zwei-Phasen-Dichtwand von 1 km Länge, bei 100 cm Dicke und einer Tiefe von 100 m. Variiert wurde lediglich die Mischungszusammensetzung der Dichtwandbetone (Plastic Concrete PC 1 und PC 2) zur Erzielung einer unterschiedlichen Festigkeit. Wenn der Zementgehalt von 200 auf 100 kg/m³, also um 50 % reduziert werden kann, wird in Summe eine Reduzierung der Emission von CO_{2eq} um rund 25 % erreicht. Die Zielfestigkeit wird ebenfalls reduziert, rechnerisch von ca. 3 MPa auf ca. 1 MPa (Bauer).

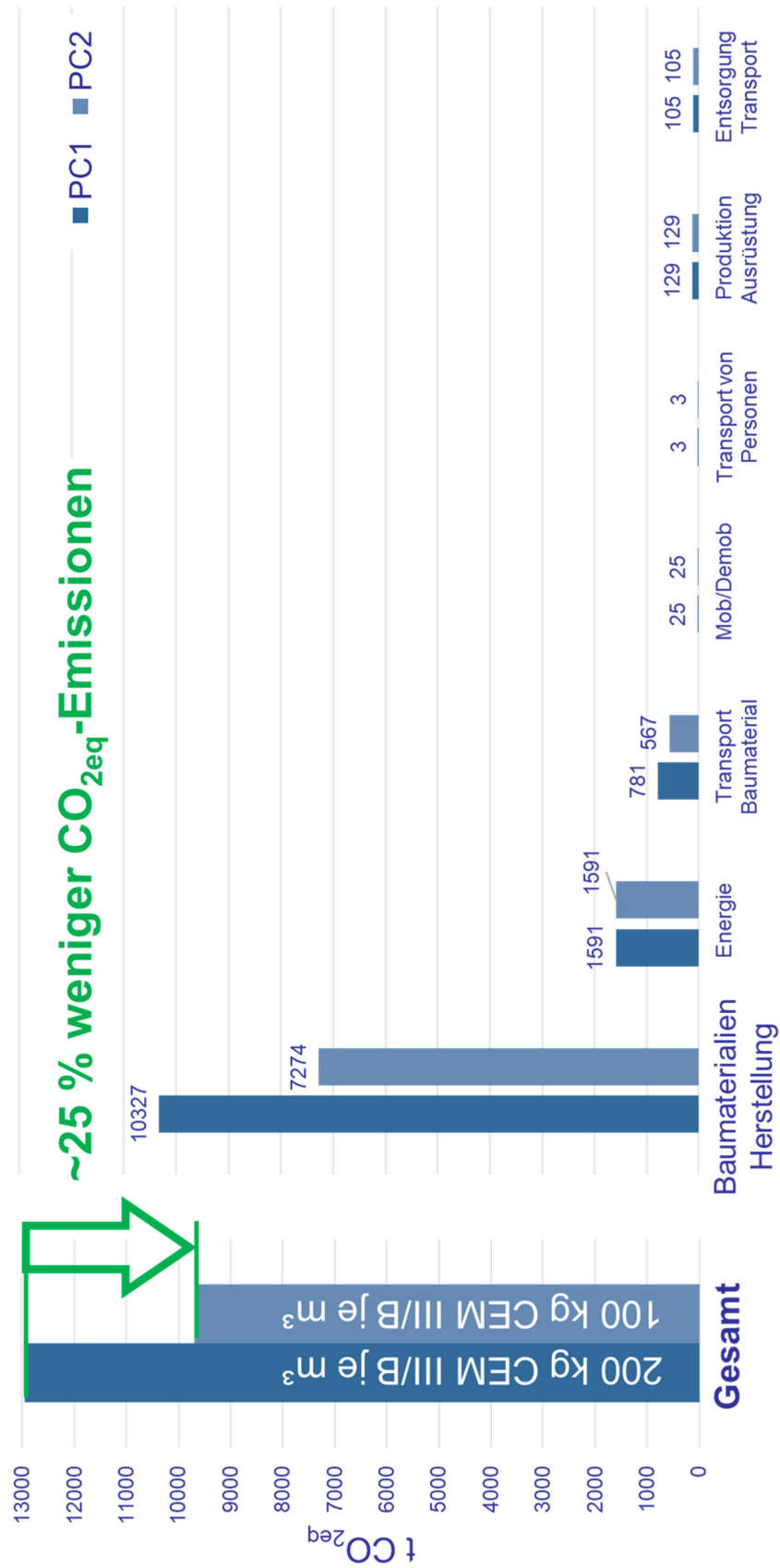


Abb. 4: Ergebnis einer Vergleichsberechnung der äquivalenten CO₂-Emissionen für eine tiefe Dichtwand (Berechnung mit dem EFFC Carbon Calculator durch Fa. Bauer)

6 Literatur

- DWA Merkblatt 512-1, 2012. *Dichtungselemente im Wasserbau*, Teil 1 Erdbauwerke, Hennef.
- DIN 18136:2003-11. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch*.
- DIN 4093:2015-11. *Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren*.
- DIN 1054:2021-04. *Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*.
- Shepherd, D. A., Kotan, E., Dehn, F., 2020. *Plastic concrete for cut-off walls: A review*, *Construction and Building Materials*, Volume 255, 2020, 119248, ISSN 0950-0618, [https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119248), 119248
- Tynior, R., Meier, T., von Wolffersdorff, P.-A., 2020. *Neuartiger Nachweis für die Gebrauchstauglichkeit von Asphaltinnendichtungen in Staudämmen*. *geotechnik*, 43: 224-236, <https://doi.org/10.1002/gete.202000012>
- Ramler-Kowollik, M., Quarg-Vonscheidt, J., 2024. *Vorschlag zur Beschreibung des einaxialen Druckverhaltens von hochverformbaren Dichtwandmassen im Modell der inneren Struktur*. *geotechnik*, 47: 243-253, <https://doi.org/10.1002/gete.202400012>

