

Empfehlungen C 2002

Baustoffe für Küstenschutzwerke

I n h a l t

1. Einführung	340
2. Boden	341
3. Natursteine	342
3.1 Allgemeine Anforderungen	342
3.2 Spezielle Anforderungen	343
3.2.1 Pflastersteine	343
3.2.2 Schüttsteine	343
3.2.3 Trockenrohdichte und Druckfestigkeit	344
3.2.4 Verwitterungsbeständigkeit	344
3.3 Qualitätsüberwachung	345
4. Künstliche Steine	345
4.1 Anforderungen	345
4.2 Verwendung	345
4.3 Prüfungen	346
5. Beton	346
5.1 Einführung	346
5.2 Europäische und Deutsche Normen	346
5.3 Ausgangsstoffe	347
5.4 Anforderungen und Zusammensetzung	347
5.4.1 Widerstand gegen Meerwasser	350
5.4.2 Widerstand gegen Wellen, Strömung und sonstige mechanische Angriffe	352
5.4.3 Hoher Frost- und Tausalz widerstand	353
5.4.4 Betonzusätze	353
5.4.5 Weitere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit	354
5.4.6 Bauteilkatalog für Bauteile im Meerwasser	355
5.5 Betonpflastersteine und Betonplatten	355
5.6 Unterwasserbeton	358
5.7 Ausgussbeton	360
5.8 Teilverguss von Steinschüttungen	361
5.9 Bodenverfestigung mit Zement	363
5.10 Sand-Zement-Schüttsteine	364
6. Asphalt	364
6.1 Allgemeines	364
6.2 Mineralstoffe	364
6.3 Bindemittel	365
6.4 Asphaltbeton, Gussasphalt und Sandasphalt	365
6.5 Hohlraumreiche Bitumen-Mineralstoff-Gemische	366
6.6 Asphalt-Eingussmassen	367
6.7 Fugenvergussmasse	367
6.8 Bitumensand	368
6.9 Sondergemische	368
6.10 Prüfungen	368
7. Geokunststoffe	370
7.1 Allgemeines	370

7.2 Rohstoffe	371
7.3 Geotextilien	372
7.3.1 Allgemeines	372
7.3.2 Gewebe	372
7.3.3 Vliesstoffe	373
7.3.4 Verbundstoffe	377
7.4 Geotextilverwandte Produkte	379
7.5 Dichtungsbahnen	380
7.6 Dichtungsbahnen verwandte Produkte	382
7.6.1 Geosynthetische Tondichtungsbahnen	382
7.7 Zusammenfassung	383
8. Holz	384
8.1 Allgemeines	384
8.2 Physikalische Eigenschaften	384
8.3 Zulässige Spannungen	384
8.4 Dauerhaftigkeit	385
8.5 Schutzmaßnahmen	385
9. Stahl	389
9.1 Allgemeines	389
9.2 Anforderungen und Eigenschaften	389
9.3 Stahlspundwände	389
9.4 Stahlpfähle	392
9.5 Drahtnetze und Drahtgeflechte	392
10. Schriftenverzeichnis	393
Zu Abschnitt 2: Boden	393
Zu Abschnitt 3: Natursteine	393
Zu Abschnitt 4: Künstliche Steine	394
Zu Abschnitt 5: Beton	394
Zu Abschnitt 6: Asphalt	395
Zu Abschnitt 7: Geokunststoffe	396
Zu Abschnitt 8: Holz	396
Zu Abschnitt 9: Stahl	397

1. Einführung

Baustoffe für Küstenschutzwerke müssen dem Verwendungszweck und den örtlichen Bedingungen entsprechen. Ihre Eignung ist zu beurteilen und zu prüfen, außerdem sind die Umweltbelange und die Prüfung der Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen. Diese Untersuchungen beziehen sich nicht nur auf die ökologisch bedeutsamen Eigenschaften der Baustoffe, sondern auch auf deren Gewinnung oder Herstellung, den Transport, die spätere Wiederverwendung oder Wiederverwertung und den Einsatz von Recyclingbaustoffen.

Die hauptsächlich verwendeten Baustoffe sind:

Boden	Asphalt
Natursteine	Geokunststoffe
Künstliche Steine	Holz
Beton	Stahl

Für Eignung, Lieferung, Lagerung, Verarbeitung und Einbau der Baustoffe sind die einschlägigen Normen, Vorschriften und Zulassungsbedingungen maßgebend. Darüber hinaus sind die zugehörigen Richtlinien und Empfehlungen zu beachten, die zusammen mit dem einschlägigen Schrifttum – getrennt nach Baustoffen – im Abschnitt 10 aufgeführt sind.

2. Boden

See- und Tidestromdeiche sind Erdbauwerke aus natürlichen Böden. Die Böden stellen somit den wesentlichen Baustoff eines Deiches dar. Dabei ist zwischen Böden für den Deichkern und für die Deichabdeckung zu unterscheiden. Während an die Böden der Deichabdeckung weitergehende Anforderung hinsichtlich Erosionsbeständigkeit, Dichtigkeit und Schrumpfverhalten zu stellen sind, müssen für Böden im Deichkern ausreichende bautechnische Eigenschaften hinsichtlich Standsicherheit, Setzungen und Einbau vorhanden sein.

Der Boden als Baustoff für den Deichbau wurde bereits in Empfehlungen B 2002 und im Abschn. 3 der Empfehlungen G 2002 ausführlich behandelt. Die nachstehenden Ausführungen sollen eine Übersicht geben und das Thema durch erläuternde Hinweise und Ergänzungen abrunden. Für die als Baustoff vorgesehenen Böden im Deichbau müssen Angaben zu den bautechnischen Eigenschaften wie Scherfestigkeit, Verdichtungsfähigkeit, Zusammendrückbarkeit, Durchlässigkeit, Witterungs- und Erosionsempfindlichkeit sowie Frostempfindlichkeit vorliegen. Darüber hinaus sollte ergänzend eine geotechnische Beschreibung und Klassifikation nach den gültigen Erdbaunormen (DIN 18196, DIN 18300 und DIN 18311) vorgenommen werden. Die Ergebnisse der Bodenbeurteilung sollten in einem geotechnischen Bericht bzw. Baugrund- oder Bodengutachten angegeben sein. Erst wenn die geotechnischen Eigenschaften der Böden eindeutig beschrieben sind, kann eine Entscheidung über Eignung und weitere Verwendung getroffen werden.

In den Abschn. 1 bis 3 der Empfehlungen B 2002 „Geotechnische Untersuchung von See- und Tidestromdeichen“ und im Abschn. 3 der Empfehlungen G 2002 „See- und Tidestromdeiche“ sind geotechnische Angaben zu den erforderlichen Kenngrößen und Verdichtungsanforderungen von Böden im Deichbau gemacht. Die nachfolgende Tabelle C 1 liefert für verschiedene deichbaurelevante Böden an Nord- und Ostsee Hinweise auf die in den Empfehlungen B 2002 und G 2002 angegebenen Grenzwerte der Bodeneigenschaften und Mindestwerte für die Verdichtungsanforderungen.

An der Nordseeküste bestehen die Deiche überwiegend aus Sandkernen und Kleidecken oder auch nur aus Klei. An der Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern sind die Deiche i.d.R. aus Sanden geschüttet und mit bindigen Böden oder künstlichen Belägen abgedeckt. Die Ostseedeiche in Schleswig-Holstein bestehen meist entweder ganz aus bindigem Boden oder aus einem Sandkern mit bindiger Abdeckung.

Die grobkörnigen Böden aus Sanden werden im Trocken- oder Spülbetrieb im Deichkern eingebaut. Aus ökologischen und wirtschaftlichen Forderungen lässt sich der Deichkern nicht immer aus reinem Sand herstellen; es müssen vielmehr weniger geeignete Böden – wie z. B. gemischtkörnige Böden aus Sand und Schluff – verwendet werden. Dass diese Böden Schwierigkeiten beim Einbau und Probleme im Hinblick auf die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit bereiten, ist in Kauf zu nehmen. Deshalb ist dafür eine intensivere geotechnische Untersuchung und vor allem Begleitung in der Bauausführung notwendig.

Bei der Wahl von bindigen Böden als Deichbaustoff ist zu unterscheiden, ob der feinkörnige Boden im Deichkern oder als Deichabdeckung eingebaut wird. Beim Einbau im Deichkern können auch Böden verwendet werden, deren Erosionsbeständigkeit und Schrumpfverhalten unter den Anforderungen für Deichabdeckungen liegen. An den Deichen der Nordseeküste wird Klei wegen seiner guten Widerstandsfähigkeit gegen Wellenangriff als Deichabdeckung verwendet. An den Deichen der Ostseeküste wurde überwiegend Geschiebemergel oder Geschiebelehm – vereinzelt auch eiszeitliche Schluffe und Tone

Tab. C 1: EAK-Empfehlungen zu den deichbaurelevanten Böden an Nord- und Ostsee in Deichkern und Deichabdeckung

Bodenarten	Küstenbereich	Deichelement	EAK-Empfehlung
Sande (grobkörnige Böden)	Nord- und Ostsee	Deichkern	B 2002 Abschn. 3.1 G 2002 Abschn. 3.2.1.1
Geschiebemergel /-lehm (feinkörnige Böden)	Ostsee	Deichkern	B 2002 Abschn. 3.2 G 2002 Abschn. 3.2.1.3
		Deichabdeckung	B 2002 Abschn. 3.2 G 2002 Abschn. 3.2.2.2
Wattsande (gemischtkörnige Böden)	Nordsee	Deichkern	G 2002 Abschn. 3.2.1.2
Geschiebesande (gemischtkörnige Böden)	Ostsee	Deichkern	G 2002 Abschn. 3.2.1.2
Klei (organogene Böden)	Nordsee	Deichabdeckung	B 2002 Abschn. 3.3 G 2002 Abschn. 3.2.2.1
Eiszeitliche Schluffe u. Tone (feinkörnige Böden)	Ostsee	Deichabdeckung	G 2002 Abschn. 3.2.2.3
Baggergut	Nord- und Ostsee	Deichabdeckung	G 2002 Abschn. 3.2.3

– als Abdeckung eingebaut. Bei jüngsten Deichbaumaßnahmen wurde auch bindiges Baggergut als Teil der Deichabdeckung verwendet, sofern die chemischen und organischen Inhaltsstoffe in ökologischer Hinsicht unbedenklich sind.

3. Natursteine

3.1 Allgemeine Anforderungen

Natursteine werden im Küstenschutz überwiegend für Schüttungen als sog. Wasserbausteine für Deckwerke und deren Fußsicherungen, seltener für Setzpacklagen und Pflasterungen verwendet. Wasserbausteine sind nach den Technischen Lieferbedingungen (TLW, 1997) Steine unterschiedlicher Größe und unregelmäßiger Form (und aus unterschiedlichen Materialien), die für wasserbauliche Schutz- und Regulierungsbauwerke verwendet werden. Sie werden auch als Schüttung für den Aufbau der Baukörper von Buhnen, Längswerken und Sohlsicherungen sowie für den Schutz von Molen, Strandmauern u. a. eingesetzt. Natursteine im Seewasserbau sollen eine hohe Festigkeit und Rohdichte haben, um die auftretenden statischen und dynamischen Beanspruchungen durch Auflast und Wasserkräfte aufnehmen zu können. Sie müssen zudem verwitterungsbeständig sein, u. a. frei von schädlichen Rissen, Schieferungen und mergeligen, sandigen oder tonigen Einlagerungen, um den Beanspruchungen durch Wasser, Luft, Frost und den biologischen wie chemischen Einflüssen zu widerstehen. Scharfe Kanten, raue Flächen, eine weitgehend kubische Form und ein gleichmäßig dichtes Gefüge sind weitere Anforderungen.

Als Wasserbausteine sind insbesondere Erstarrungsgesteine geeignet; Sandsteine und Quarzite werden ebenfalls verwendet. Mineralgefüge, Schichtung und Porosität sind für die Witterungsbeständigkeit und den Widerstand gegen Beanspruchungen aus Frost-Tau-Wechseln ausschlaggebend.

Die an den deutschen Küsten vor allem verwendeten Gesteine sind in Tab. C 2 zusammengestellt.

Tab. C 2: Im deutschen Küstengebiet verwendete Natursteine

Gesteinsart	Dichte ρ_0 t/m ³	mittl. Schüttdichte ρ_s^e bei Porenvol. von 40 bis 45 % t/m ³	Herkunft
Basalt	2,9 ... 3,1	1,70	Mittelrhein, ehem. Tschechoslowakei
Labradorit	2,9 ... 3,1	1,70	Norwegen
Norit	2,9 ... 3,1	1,70	Norwegen
Diorit	2,8 ... 3,0	1,65 }	verschiedene
Gabbro	2,8 ... 3,0	1,65 }	Herkunftsländer
Diabas	2,8 ... 2,9	1,65	Harz, Schweden
Granit	2,6 ... 2,8	1,55 }	Schweden, Bornholm
Syenit	2,6 ... 2,8	1,55 }	
Quarzporphyr	2,55 ... 2,8	1,55 }	verschiedene
Grauwacke	2,6	1,50 }	Herkunftsländer
Piesberger Karbonquarzit	2,6	1,50	Raum Osnabrück
Quarzit	2,6	1,50	Harz

3.2 Spezielle Anforderungen

3.2.1 Pflastersteine

Aus Felsgestein gewonnene, behauene Pflastersteine müssen quaderförmig sein und ebene Oberflächen haben. Unbehauene (bruchraue) Pflastersteine sollen eine quaderähnliche, parallellächtige Form aufweisen. Die Abmessungen werden nach dem Verwendungszweck und den einwirkenden Kräften festgelegt.

3.2.2 Schüttsteine

Schüttsteine sind gebrochene Natursteine, deren Größe und Gewichte von der Dicke und der Beanspruchung der Schüttsteinlage und ihrer konstruktiven Ausbildung – mit oder ohne Verguss – abhängig sind.

Die Abmessungen von Schüttsteinen sind nach dem Verwendungszweck und den einwirkenden Kräften aus Wellen, Strömung, Schiffsschraubenstrahl und Eis in Größenklassen festgelegt (Tab. C 3).

Es reicht im Allgemeinen aus, stichprobenartig etwa 10 Steine nachzumessen und im Übrigen die Steingrößen nach Augenschein abzuschätzen. Für ungebundene Steinschüttungen darf eine Lieferung bis zu 10 Gew.-% Wasserbausteine mit Überlängen und bis zu 15 Gew.-% mit Unterlängen enthalten. Der Anteil von Steinen mit Längen unter 5 cm sind bei den Größenklassen I und II nur bis zu 5 Gew.-% zugelassen.

Tab. C 3: Größenklassen von Schüttsteinen (TLW, 1997)

Größenklasse	Abmessungen ¹ in cm
0	5–15
I	10–20
II	10–30
III	15–45
IV	20–60
V ²	35–100

1 Die gegebenen Grenzwerte einer Klasse gelten für die jeweils größte Steinlänge.
2 Klasse V gilt nur für Schüttsteine aus Felsgestein.

Um eine gute Verteilung der eingebauten Schüttsteine zu erreichen, darf der Anteil ungünstig geformter Steine bis zu 20 Gew.-% einer Lieferung betragen. Ungünstig geformt sind Steine, bei denen das Verhältnis der kleinsten zur größten Steinlänge 1 : 3 überschreitet.

Das erforderliche Einzelgewicht unverklammerter Schüttsteine ist in erster Linie nach der Beanspruchung durch Wasserkräfte, nach der Rauigkeit und Neigung der Böschung, ihrer Lage (einzeln oder verkeilt) sowie abhängig von der Rohdichte und Form der Steine zu wählen. Bei einem verklammerten Deckwerk sind geringere Steingewichte möglich. Das Einzelgewicht sollte jedoch nicht kleiner als 20 kg sein. Das Schüttgewicht schwankt je nach Größe und Rohdichte der Steine zwischen 1,4 und 1,6 t/m³ und ist jeweils an Ort und Stelle zu bestimmen. Für teil- und vollvergossene Steinschüttungen sind bei Über- und Unterlängen jeweils die Grenzen von 10 Gew.-% einzuhalten, bei Längen unter 5 cm bei Größenklasse I und II von 3 Gew.-%.

3.2.3 Trockenrohichte und Druckfestigkeit

Die Trockenrohichte ist nach DIN 52102 zu bestimmen und darf im Mittel den Wert von 2,3 kg/dm³ nicht überschreiten (Einzelwerte ≥ 2,27 kg/dm³). Anzustreben ist eine Rohichte >2,5 kg/dm³.

Die Druckfestigkeit ist nach DIN 52105 zu bestimmen. Sie muss im lufttrockenen Zustand der Proben im Mittel mindestens 80 N/mm² betragen (Einzelwerte ≥ 70 N/mm², Prüfung von mindestens 10 Wasserbausteinen).

3.2.4 Verwitterungsbeständigkeit

Die Verwitterungsbeständigkeit ist nach DIN 52106, die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DIN 52103 zu bestimmen. Ist die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck < 0,5 Gew.-% und treten bei der Wasserlagerung keine Risse oder sonstige Anzeichen von Schäden auf, so gelten die Wasserbausteine als verwitterungsbeständig. Ein Frostversuch ist dann in der Regel nicht erforderlich.

Ist die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck >0,5 Gew.-%, so sind in jedem Fall Frostversuche nach dem Luftfrostverfahren erforderlich. Die Frostprüfung gilt als bestan-

den, wenn der Gewichtsverlust unter 0,5 Gew.-% bleibt und keine Schäden wie Risse und Abplatzungen auftreten.

3.3 Qualitätsüberwachung

Die Qualitätseigenschaften der Natursteine werden in den Lieferwerken durch Eigen- und Fremdüberwachung kontrolliert. Im Rahmen der Prüfungen werden Abmessungen, Trockenrohdichte, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme und Verwitterungsbeständigkeit regelmäßig ermittelt.

4. Künstliche Steine

4.1 Anforderungen

Als künstliche Steine werden im Küstenwasserbau Eisenhütten- und Metallhüttenschlacke, Betonsteine und Sand-Zement-Steine verwendet. Voraussetzung dafür ist, dass sie die Qualitätsanforderungen (s. Abschn. 4.3) erfüllen. Ziegelsteine sind heute bei Neubauten nicht mehr gebräuchlich, es sei denn als Verblendmauerwerk. Betonsteine werden in Abschn. 5 behandelt.

Eisenhüttenschlacke wird als künstliche Gesteinsschmelze bei der Erzeugung von Roheisen und Stahl gewonnen. Metallhüttenschlacke entsteht bei der Gewinnung von Kupfer und Zink aus Erzen oder Sekundärstoffen. Alle Schlackenarten müssen bei Verwendung als Baustoff in kristalliner Form vorliegen und dürfen keine Verunreinigungen enthalten. Der Anteil an schaumigen und glasigen Schlackenstücken darf 5 Gew.-% nicht überschreiten. Sie müssen raumbeständig, frost- und wetterbeständig sein und ein dichtes Gefüge haben. Die Qualität muss den Anforderungen der DIN 4301 „Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen“ sowie den Bedingungen des Abschn. 3.1 „Natursteine“ entsprechen. Bei Metallhüttenschlacken liegen zzt. über die mögliche Auslaugung von Schadstoffen keine gesicherten Daten vor. Es wird empfohlen, diese Frage beim Einsatz derartiger Baustoffe zu beachten. Dazu wird auf die Veröffentlichungen von BERTSCH u. SEEHAUS, 2002, sowie GEBAUER et al., 2001, verwiesen.

4.2 Verwendung

Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke werden im gebrochenen Zustand als Schotter und Split, ungebrochen als Schüttsteine und gegossen als Schlackenformsteine eingebaut. Für Eisenhüttenschlacke als Gesteinskörnung für Beton gilt DIN 4226 (s. Abschn. 5). Schlackenformsteine sollen vollkantig sein und ebene Flächen mit möglichst geschlossener Struktur aufweisen. Die Kopfflächen von Kupferschlackensteinen müssen gesandet oder gesplittet sein.

Die Rohdichten sollen für Eisenhüttenschlacke $\geq 2,4 \text{ kg/dm}^3$, für Metallhüttenschlacke $\geq 3,5 \text{ kg/dm}^3$ betragen. Die Schüttgewichte für Schotter sollten bei Eisenhüttenschlacke über $1,4 \text{ kg/dm}^3$, bei Metallhüttenschlacke über $1,5 \text{ kg/dm}^3$ liegen. Kupferschlackensteine werden mit Rohdichten von $3,6$ und $2,9 \text{ kg/dm}^3$ eingesetzt. Damit werden bei Stückgewichten zwischen 35 kg und 63 kg Flächenlasten von $5,25$ bis $12,60 \text{ kN/m}^2$ erreicht.

4.3 Prüfungen

Die Prüfung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften der künstlichen Steine sollte mindestens erfassen:

- Beurteilung der Kanten, Kopf- und Seitenflächen nach Augenschein,
- Abmessungen und Gewicht,
- Rohdichte nach DIN 52102 (s. Abschn. 3) und
- Frost- und Wetterbeständigkeit nach DIN 52104 bzw. DIN 52106 (s. Abschn. 3).

5. Beton

5.1 Einführung

Der „moderne“ Beton ist i.d.R. ein 5-Stoff-Gemisch aus Zement, grober und feiner Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzmittel(n) und Zusatzstoff(en). Er enthält seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements.

Für den Bau von Küstenschutzwerken werden Ortbeton, vorgefertigte Betonbauteile, Stahlbetonbauteile und Spannbetonbauteile verwendet. Zum Ortbeton zählen auch Sonderbauweisen wie Unterwasserbeton, Ausgussbeton, Spritzbeton, Fugenverguss und Steinverklammerung. Zu den vorgefertigten Bauteilen gehören neben schweren Formkörpern (z. B. Tetrapoden), großformatigen bewehrten Platten, Pflaster- und Treppensteinen u. a. auch große einschwimmbare konstruktive Bauelemente (z. B. Gründungscaissons), Molen, Schutzmauern, Bühnen, Wellenbrecher und schwimmende Bauwerke.

Für die Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke sind neben der Betonzusammensetzung die fachgerechte Verarbeitung und eine frühzeitig einsetzende und ausreichend lange Nachbehandlung ausschlaggebend (s. Abschn. 5.4). Bei Stahlbeton und Spannbetonbauteilen kommt dem Schutz der Bewehrung durch eine ausreichend dicke und gleichzeitig dichte Betondeckung ebenfalls eine für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks maßgebende Bedeutung zu.

5.2 Europäische und Deutsche Normen

Die harmonisierten europäischen Bauproduktnormen für Zement sind im November 2000 erschienen: DIN EN 197-1 „Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“ und DIN EN 197-2 „Konformitätsbewertung“, dazu für Regelungen der Zemente mit besonderen Eigenschaften die sog. Restnorm 1164 „Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis“. Dieses aus drei Normen bestehende Paket ersetzt DIN 1164-1 und -2 seit April 2001.

Ähnliches gilt auch für den Baustoff Beton. Mit der Herausgabe und Einführung der Betonnormen DIN 1045-1, DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3 und DIN 1045-4 im Jahr 2001/2002 werden Planung und Ausführung von Bauwerken aus Beton und die Herstellung von Beton neu geregelt. Parallel dazu erschienen zahlreiche begleitende Normen, z. B. betr. Gesteinskörnungen (Zuschläge), Flugasche und Silikastaub als mögliche Bestandteile des Betons sowie Prüfnormen, die zu beachten sind.

Für die im Betonbau tätigen Fachleute bedeutet dies eine Umstellung auf neue technische Inhalte, Regeln und Verfahren. Neben einer veränderten Terminologie gilt auch eine

Neuordnung der Verantwortlichkeiten der am Bau Beteiligten. Mit den strukturellen Änderungen in den Normen werden vor allem die Leistungen und Pflichten des Planenden erweitert und deutlicher beschrieben. Die Betonnormung legt neben der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit gleichrangig die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen als Entwurfskriterium fest.

Der Umgang mit dieser neuen Normengeneration ist wegen der neuen Strukturen, neuen Begriffe, neuen Verfahrensweisen und neuen Anforderungen in der Anfangszeit ungewohnt. Deshalb werden in den beiden folgenden Abschnitten die für Planung, Entwurf und Bauausführung wesentlichen Kernbereiche dieser Normen durch schnell zu erfassende Tafeln vorgestellt. Diese Übersichten sollen eine praktische Hilfe bieten, bewährte Planungsvorgänge nach den neuen Baunormen auszuführen.

5.3 Ausgangsstoffe

Als Bindemittel dürfen nur Zemente nach DIN EN 197-1 und DIN 1164 oder bauaufsichtlich zugelassene Zemente verwendet werden. Darüber hinaus ist der zulässige Anwendungsbereich des Zementes in Abhängigkeit von der Expositionsklasse einzuhalten (DIN EN 206-1/DIN 1045-2; Tab. F. 3). Zu den Gesteinskörnungen für Beton (früher als Betonzuschlag bezeichnet) zählen gebrochene und ungebrochene dichte Gesteinskörnungen aus natürlichem Gestein sowie künstlich hergestellte Körnungen, wie z. B. aus Hochofen- und Metallhütten-Stückschlacke. Sie müssen hinsichtlich Kornzusammensetzung, Reinheit, Festigkeit, Kornform sowie Widerstand gegen Frost und Verschleiß erhöhten Anforderungen genügen, die in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 und DIN 4226 festgelegt sind. Insbesondere sind die Anforderungen für Frostangriff mit Taumittel und mäßiger bzw. hoher Wassersättigung einzuhalten. Dies bedeutet, dass Gesteinskörnungen einen Magnesium-Sulfat-Wert (Masseverlust nach fünfmaligem Eintauchen in gesättigte Magnesiumsulfatlösung) von 25 (MS_{25}) bzw. 18 (MS_{18}) Masse-% unterschreiten müssen. Darüber hinaus wird empfohlen, den Frostwiderstand (Masseverlust nach 10 Frost-Tauwechseln) auf ≤ 1 Masse-% zu begrenzen (F₁). Bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen ist die Alkali-Richtlinie zu beachten. Die Bauteile sind in die Feuchtigkeitsklasse WA („feucht + Alkalizufuhr von außen“) zuzuordnen, und es sind NA-Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt einzusetzen.

Als Zugabewasser ist Trinkwasser sowie im Allgemeinen in der Natur vorkommendes Wasser geeignet. Auszuschließen ist Wasser, das Bestandteile enthält, die das Erhärten oder andere Eigenschaften des Betons ungünstig beeinflussen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen (u. U. Industrieabwässer, Moorwasser, Sickerwasser von Halden usw.). Im Zweifelsfall ist die Eignung des Wassers zur Betonherstellung zu untersuchen. Als geeignet gilt auch Restwasser nach der DAfStb-Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Meerwasser darf nur für unbewehrten und bewehrten Beton nicht berührende Bauteile verwendet werden.

5.4 Anforderungen und Zusammensetzung

Der neuen Normengeneration im Betonbau (DIN 1045-1, DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4) liegt neben dem Standsicherheitsnachweis erstmals die Forderung nach Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke zugrunde. Dabei soll die Dauerhaftigkeit

durch Planung, Konstruktion, Bemessung, Baustoffauswahl und Bauausführung erreicht werden.

Der Planer hat Betonbauwerken hinsichtlich der zu erwartenden Umwelteinwirkungen (auch „Angriffe“ genannt) „Expositionsklassen“ zuzuordnen. Die sieben Expositionsklassen berücksichtigen den Angriff auf die Bewehrung und den Beton. Ein Angriff auf die Bewehrung kann durch Karbonatisierung oder Chloride ausgelöst werden; ein Angriff auf den Beton kann durch Frost, chemischen Angriff oder Verschleißbeanspruchung verursacht werden. Jede Expositionsklasse mit Ausnahme der Klasse X0 („Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko“) ist hinsichtlich der Stärke des Angriffs in drei bzw. vier Stufen unterteilt (Tab. C 4).

In Abhängigkeit von der Expositionsklasse werden Mindestdruckfestigkeitsklasse, Betondeckung, Begrenzung der Rissbreite, Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton und Nachbehandlung festgelegt. Im Folgenden werden die Angriffe auf Küstenschutzbauwerke aus Beton sowie die daraus resultierenden Festlegungen dargelegt. Für einige Küstenschutzbauwerke werden eine beispielhafte Zuordnung zu den Expositionsklassen und die daraus resultierenden planerischen Vorgaben vorgestellt.

Tab. C 4: Expositionsklassen, bezogen auf die Umweltbedingungen (DIN 1045-1, DIN EN 206-1, DIN 1045-2)

Klasse Umgebung		Beispiele	min f_{ck} *
Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko¹			
X0	alle Expositionsklassen außer XF, XA, XM	Fundamente ohne Bewehrung und ohne Frost; Innenbauteile ohne Bewehrung	C 8/10
Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung²			
XC1	trocken oder ständig nass	Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte (einschl. Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden); Beton, der ständig in Wasser getaucht ist	C 16/20
XC2	nass, selten trocken	Teile von Wasserbehältern; Gründungsbauteile	C 16/20
XC3	mäßige Feuchte	Bauteile, zu denen die Außenluft häufig oder ständig Zugang hat, z. B. offene Hallen; Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit z. B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäschereien, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen	C 20/25
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung	C 25/30
Bewehrungskorrosion durch Chloride außer Meerwasser³			
XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen; Einzelgaragen	C 30/37 ⁵
XD2	nass, selten trocken	Solebäder; Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind	C 35/45 ⁵
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; Parkdecks	C 35/45 ⁵

* f_{ck} = Charakteristische Betonfestigkeit nach 28 Tagen.
1 Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht Beton angreifender Umgebung.
2 Beton mit Bewehrung oder and. eingebettetem Metall, der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt.

Klasse	Umgebung	Beispiele	min f_{ck}
Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser⁴			
XS1	salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser	Außenbauteile in Küstennähe	C 30/37 ⁵
XS2	unter Wasser	Bauteile in Hafenanlagen, die ständig unter Wasser liegen	C 35/45 ⁵
XS3	Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche	Kaimauern in Hafenanlagen	C 35/45 ⁵
3 Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält und chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser ausgesetzt ist. 4 Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft ausgesetzt ist. 5 Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositionsklasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger.			
Frostangriff mit oder ohne Taumittel⁶			
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbaustelle	C 25/30
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4: Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser	C 35/45 ⁸
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser	C 35/45 ⁸
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumitteln behandelt werden; überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen; Räumlerlaufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone	C 30/37 nur als LP-Beton zulässig
Betonangriff durch Verschleißbeanspruchung⁷			
XM1	mäßige Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge	C 30/37 ⁹
XM2	starke Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler	C 35/45 ^{9,10}
XM3	sehr starke Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; Oberflächen, die häufig mit Kettenfahrzeugen befahren werden; Wasserbauwerke in geschiebelasteten Gewässern, z. B. Tosbecken	C 35/45 ⁹
6 Durchfeuchteter Beton, der in erheblichem Umfang Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt ist. 7 Beton, der einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist. 8 Bei LP-Beton zwei Festigkeitsklassen niedriger. 9 Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositionsklasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger. 10 Bei Oberflächenbehandlung des Betons eine Festigkeitsklasse niedriger.			

Klasse	Umgebung	Beispiele	min f_{ck}
Betonangriff durch aggressive chemische Umgebung¹¹			
XA1	chemisch schwach angreifende Umgebung nach Tab. C 6	Behälter von Kläranlagen; Güllebehälter	C 25/30
XA2	chemisch mäßig angreifende Umgebung nach Tab. C 6 und Meeresbauwerke	Betonbauteile, die mit Meerwasser in Berührung kommen; Bauteile in betonangreifenden Böden	C 35/40 ¹²
XA3	chemisch stark angreifende Umgebung nach Tab. C 6	Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern; Gärfuttersilos und Futtertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung	C 35/45 ¹²
11 Beton, der chemischen Angriffen durch natürliche Böden, Grund- oder Meerwasser gemäß Tab. C 6 ausgesetzt ist.			
12 Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositionsklasse XF eine Festigkeitsstufe niedriger.			

5.4.1 Widerstand gegen Meerwasser

Meerwasser enthält als betonangreifende Bestandteile vorwiegend Magnesiumverbindungen und Sulfate. Nordsee und Ostsee haben annähernd die in Tab. C 5 angegebene Zusammensetzung.

Tab. C 5: Zusammensetzung von Meerwasser (Richtwerte) nach DIN 4030

1 Bestandteile	2 Nordsee (Helgoland) mg/l	3 Ostsee (Kieler Bucht) mg/l
Na ⁺	11 000	5000
K ⁺	400	200
Ca ²⁺	400	200
Mg ²⁺	1 300	600
Cl ⁺	19 900	9000
SO ₄ ²⁺	2 800	1300
pH-Wert	> 8	> 7

Der Gesamtsalzgehalt beträgt in der Nordsee, ähnlich wie im Atlantischen Ozean, etwa 36 000 mg/l, in der Ostsee (Kieler Bucht) im Jahresmittel etwa 16 000 mg/l.

Bei Meerwasser ist trotz des hohen Sulfatgehaltes die Verwendung von Zement mit hohem Sulfatwiderstand nicht erforderlich. Beton widersteht den Angriffen durch Meerwasser, wenn er nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 die Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften der Expositionsklasse XA2 (chemisch mäßig angreifende Umgebung nach Tab. C 6) einhält.

Meerwasser im Bereich von Fluss- und Kanalmündungen und Brackwasser können Zusammensetzungen aufweisen, die von den Werten der Tab. C 5 erheblich abweichen. Liegen für derartige Wässer keine mehrjährigen Analysen vor, aus denen auch mögliche Schwankungen des Salzgehaltes abgeschätzt werden können, so sind die Wässer in der Regel als „mäßig

angreifend“ nach Tab. C 6 einzustufen. Es ist ein HS-Zement nach DIN 1164 zu verwenden. Bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers von $\text{SO}_4^{2-} \leq 1500 \text{ mg/l}$ darf anstelle von HS-Zement eine Mischung von Zement und Flugasche verwendet werden (DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschn. 5.2.5.2.2). Liegen jedoch entsprechende Analysenwerte vor, kann die Beurteilung der Wässer auf Grundlage der Grenzwerte nach Tab. C 6 erfolgen. Entsprechen die Analysenergebnisse den Richtwerten nach Tab. C 5, dies gilt vor allem auch für den Gesamtsalzgehalt, so kann auf die Verwendung eines HS-Zementes verzichtet werden. Das Wasser ist für die Zeilen 1 bis 4 der Tab. C 6 als XA2 („mäßig angreifend“) einzustufen.

Die Grenzwerte der Betonzusammensetzung nach Tab. C 7 sind einzuhalten. Darüber hinaus sollte die Kornzusammensetzung im Bereich 3 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Anhang L, liegen. Der Beton sollte soviel Mehlkorn (Korngehalt $\leq 0,125 \text{ mm}$ aus Gesteinskörnungen, Zement und ggf. Zusatzstoffen) enthalten, dass er gut verarbeitbar ist und ein geschlossenes Gefüge erhält. Gleichzeitig ist der Mehlkorngehalt nach oben zu begrenzen (Tab. C 8).

Tab. C 6: Grenzwerte für die Expositionsklasse bei chemischem Angriff durch Grundwasser (DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Tabelle 2)^{1,2}

Beschreibung der Umgebung	chemisch schwach angreifend	chemisch mäßig angreifend und Meeresbauwerke	chemisch stark angreifend
chemisches Merkmal	XA1	XA2	XA3
pH-Wert	6,5 ... 5,5	< 5,5 ... 4,5	< 4,5 und $\geq 4,0$
Kalk lösende Kohlensäure (CO_2) [mg/l]	15 ... 40	> 40 ... 100	> 100 bis zur Sättigung
Ammonium (NH_4^+)[mg/l]	15 ... 30	> 30 ... 60	> 60 ... 100
Magnesium (Mg^{2+})[mg/l]	300 ... 1000	> 1000 ... 3000	> 3000 bis zur Sättigung
Sulfat (SO_4^{2-}) [mg/l]	200 ... 600	> 600 ... 3000	> 3000 und ≤ 6000

- 1 Werte gültig für Wassertemperatur zwischen 5°C und 25°C sowie eine sehr geringe Fließgeschwindigkeit (näherungsweise wie für hydrostatische Bedingungen).
- 2 Der schärfste Wert für jedes einzelne Merkmal ist maßgebend. Liegen zwei oder mehr angreifende Merkmale in derselben Klasse, davon mind. eines im oberen Viertel (bei pH im unteren Viertel), ist die Umgebung der nächsthöheren Klasse zuzuordnen.
Ausnahme: Nachweis über eine spezielle Studie, dass dies nicht erforderlich ist.

Tab. C 7: Grenzwerte der Betonzusammensetzung bei chemischem Angriff

Expositionsklassen	Aggressive chemische Umgebung		
	XA1	XA2	XA3
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,60	0,50	0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C 25/30	C 35/45 ²	C 35/45 ²
Mindestzementgehalt ¹ in kg/m^3	280	320	320
Mindestzementgehalt ¹ bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m^3	270	270	270

- 1 Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m^3 reduziert werden.
- 2 Bei Verwendung von Luftporenbeton aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger.

Tab. C 8: Höchstzulässiger Mehlkorngesamt für Beton bis zur Festigkeitsklasse C 50/60 und LC 50/55

Zementgehalt ¹	Höchstzulässiger Mehlkorngesamt [kg/m³]		
	Expositionsklassen		
	XF, XM	X0, XC, XD, XS, XA	
	Größtkorn der Gesteinskörnung		
	8 mm	16 ... 63 mm	8 ... 63 mm
≤300	450 ²	400 ²	550
≥350	500 ²	450 ²	550

- 1 Für Zwischenwerte ist der Mehlkorngesamt gradlinig zu interpolieren.
- 2 Die Werte dürfen insgesamt um max. 50 kg/m³ erhöht werden, wenn
 - der Zementgehalt 350 kg/m³ übersteigt, um den über 350 kg/m³ hinausgehenden Zementgehalt.
 - ein puzzolanischer Zusatzstoff Typ II (z. B. Flugasche, Silika) verwendet wird, um dessen Gehalt.

5.4.2 Widerstand gegen Wellen, Strömung und sonstige mechanische Angriffe

Die i.d.R. gegebene starke mechanische Beanspruchung der Betonoberflächen – z. B. durch häufige Stöße, durch Sand-Wassergemische mit großer Strömungsgeschwindigkeit oder Wellenschlag – verlangt einen Widerstand des Betons gegen Verschleißbeanspruchung. Betonangriff durch Verschleißbeanspruchung wird in die Expositionsklassenbezeichnungen mäßiger (XM1), starker (XM2) und sehr starker (XM3) Angriff unterteilt. Die meisten Küstenschutzbauwerke sind in die Klasse XM1 einzuordnen.

Der Beton muss die Grenzwerte der Tab. C 9 einhalten. Der Zementgehalt darf 360 kg/m³ nicht übersteigen. Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Mindestzementgehalt, auch bei Anrechnung von Zusatzstoffen, um 30 kg/m³ reduziert werden. Die Gesteinskörnungen bis 4 mm Größtkorn müssen überwiegend aus Quarz oder aus Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand (Kap. 3; s. DIN 52 100, Tafel 1, Spalte 8). Die Körner aller Gesteinskörnungen sollen mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben.

Tab. C 9: Grenzwerte der Betonzusammensetzung bei Verschleißangriff

Expositionsklassen	Verschleißangriff			
	XM1	XM2	XM3	
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,55	0,55	0,45	0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45
Mindestzementgehalt in kg/m³	300	300	320	320
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	270	270	270	270
Andere Anforderungen	–	Oberflächenbehandlung des Betons	–	Hartstoffe nach DIN 1100

Das Gesteinskorngemisch soll möglichst grobkörnig sein und möglichst nahe an der Sieblinie A (DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Anhang L) liegen. Bei der Verwendung von Luftporenbeton aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF (Frostangriff) darf die Festigkeitsklasse eine Klasse niedriger gewählt werden.

5.4.3 Frost- und Tausalzwiderstand

Die Anforderungen an den Frost- und Tausalzwiderstand ergeben sich aus den Expositionsclassen XF (Frostangriff) (Tab. C 10). Durch die im Meerwasser enthaltenen Chloride sind Meerwasserbauwerke den Klassen XF2 (mäßige Wassersättigung, mit Taumittel) oder XF4 (hohe Wassersättigung, mit Taumittel) zuzuordnen.

Tab. C 10: Grenzwerte der Betonzusammensetzung bei Frostangriff

Expositionsclassen	Frostangriff					
	XF1	XF2		XF3		XF4
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,60	0,55 ⁷	0,50 ⁷	0,55	0,50	0,50 ⁷
Mindestdruckfestigkeitsklasse ³	C 25/30	C 25/30	C 35/45	C 25/30	C 35/45	C 30/37
Mindestzementgehalt ^{4, 2} in kg/m ³	280	300	320	300	320	320
Mindestzementgehalt ^{4, 2} bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³	270	– ⁷	– ⁷	270	270	– ⁷
Mindestluftgehalt in % ⁶	–	– ⁶	–	– ⁶	–	– ⁶ , – ¹⁰
Andere Anforderungen	Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlichem Widerstand gegen Frost bzw. Frost und Taumittel (siehe DIN 4226-1)					
	F ₄	MS ₂₅		F ₂		MS ₁₈

2 Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung 80 cm) gilt der Mindestzementgehalt von 300 kg/m³.
3 Gilt nicht für Leichtbeton.
4 Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden. In diesem Fall darf Fußnote² nicht angewandt werden.
6 Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm ≥ 5,5 % Volumenanteil, 16 mm ≥ 4,5 % Volumenanteil, 32 mm ≥ 4,0 % Volumenanteil und 63 mm ≥ 3,5 % Volumenanteil betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 % Volumenanteil unterschreiten.
7 Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z-Wert angerechnet werden.
10 Erdfeuchter Beton mit w/z ≥ 0,40 darf ohne Luftporen hergestellt werden.

5.4.4 Betonzusätze

Betonzusätze – das sind Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe, die bestimmte Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons günstig beeinflussen – können bei amtlich nachgewiesener Eignung verwendet werden.
Betonzusatzmittel müssen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 eine gültige allgemeine bauaufsichtliche oder europäische technische Zulassung besitzen und zudem überwacht und zertifiziert sein. Sie beeinflussen durch chemische und/oder physikalische Wirkung z. B. die Verarbeitbarkeit, das Erhärten oder das Erstarren des Betons. Ihrer Verwendung hat stets

eine Eignungsprüfung des Betons mit den vorgesehenen Zusatzmitteln voranzugehen, die belegt, dass der Frisch- und Festbeton die geforderten Eigenschaften erreicht. Die zulässigen Zugabemengen sind in Tab. C 11 wiedergegeben. Flüssige Betonzusatzmittel sind dem Wassergehalt bei der Bestimmung des Wasserzementwertes zuzurechnen, wenn ihre gesamte Zugabemenge 3 l/m³ Frischbeton übersteigt.

Tab. C 11: Zugabemengen für Betonzusatzmittel nach DIN EN 206-1/DIN 1045-22

Anwendungsbereich ¹	Zugabemengen ⁶ in ml (cm ³) bzw. g je kg Zement		
	Mindestzugabe ²	Höchstzugabe ³ eines Mittels	mehrerer Mittel
Beton, Stahlbeton und Spannbeton		50	60
Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag	2	20 ⁵ oder 50 ⁵	– ⁵
Hochfester Beton		70 ⁴	80

1 Bei Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag Alkali-Richtlinie beachten.
2 < 2 möglich, wenn ein Teil des Zugabewassers aufgelöst.
3 Maßgebend sind die Angaben des Zulassungsbescheids.
4 Eines verflüssigenden Zusatzmittels.
5 Abhängig vom Alkaligehalt des Zusatzmittels; Angaben im Prüfbescheid.
6 Mit besonderem Nachweis sind – außer bei hochfestem Beton – auch größere Mengen möglich.

Betonzusatzstoffe (z. B. Flugasche oder Trass) sind fein aufgeteilte Zusätze, die in so großer Menge zugegeben werden, dass sie als Volumenanteil zu berücksichtigen sind. Sie müssen einer dafür vorgesehenen Norm (z. B. DIN EN 450 für Flugasche oder DIN 51 043 für Trass) entsprechen oder eine allgemeine bauaufsichtliche oder europäische technische Zulassung besitzen. Betonzusatzstoffe sind vorteilhaft bei Massenbetonbauwerken eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit und Temperaturentwicklung des erhärtenden Betons günstig zu beeinflussen. Wegen des notwendigen Frostwiderstandes muss die Zugabe jedoch begrenzt und die Nachbehandlungsdauer in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons verlängert werden.

5.4.5 Weitere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit

Die aggressiven Umgebungsbedingungen der Küste – Frost bei wassergesättigtem Beton und die Chloride des Meerwassers – erfordern für die Stahlbewehrung einen optimalen Schutz. Die Expositionsklasse für die Gefahr der Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser (XS), ist entweder als XS1 (salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser), XS2 (unter Wasser) oder XS3 (Tidebereich, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche) festzulegen. Neben den Grenzwerten der Tab. C 12 ist das Nennmaß der Betondeckung von 55 mm einzuhalten. Für Bauteile in der Wasserwechselzone werden 60 bis 80 mm empfohlen. Bei Verschleißbeanspruchung besteht alternativ zu zusätzlichen Anforderungen an die Gesteinskörnung die Möglichkeit, die Mindestbetondeckung der Bewehrung zu erhöhen (Verschleißschicht). Die Richtwerte für die Dicke der Verschleißschicht betragen bei XM1 + 5mm, bei XM2 + 10 mm und bei XM3 +15 mm.

Abstandhalter aus Beton oder faserbewehrtem Mörtel haben sich bewährt. Die geometrisch mögliche, dichte Umhüllbarkeit der Abstandhalter ist wichtig.

Tab. C 12: Grenzwerte der Betonzusammensetzung bei Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser

Expositionsklassen	Chloride aus Meerwasser		
	XS1	XS2	XS3
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,55	0,50	0,45
Minstdruckfestigkeitsklasse ³	C 30/37 ⁵	C 35/45 ⁵	C 35/45 ⁵
Mindestzementgehalt ⁴ in kg/m ³	300	320 ²	320 ²
Mindestzementgehalt ⁴ bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³	270	270	270

2 Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung 80 cm) gilt der Mindestzementgehalt von 300 kg/m³.
3 Gilt nicht für Leichtton.
4 Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden, in diesem Fall darf die Fußnote² nicht angewendet werden.
5 Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger.

Die Rissbreite w_k ist rechnerisch für die Expositionsklasse XS bei Stahlbetonbauteilen auf 0,3 mm zu begrenzen (DIN 1045-1, Abschn. 11.2).

Neben einer vollständigen Betonverdichtung kommt der sorgfältigen Nachbehandlung eine besondere Bedeutung zu. Um eine funktionstüchtige dichte Betondeckung zu erreichen, müssen Nachbehandlungsart und -dauer auf Betonzusammensetzung und Frischbetontemperatur abgestimmt werden. Die Tabellen C 13 und C 14 fassen die Art der Maßnahmen und die Mindestnachbehandlungsdauer unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Bauwerke an der Küste in Anlehnung an DIN 1045-3 zusammen.

5.4.6 Bauteilkatalog für Bauteile im Meerwasser

Beispiele für die Einstufung von üblichen Betonbauteilen im Küstenschutz sind in Tab. C 15 zusammengestellt. Neben den Expositionsklassen ist die maßgebende Minstdruckfestigkeit, die Mindestbetondeckung sowie die Überwachungsklasse angegeben. Diese Planungshilfe ersetzt nicht die projektbezogene Planung. Sie entbindet nicht von der Pflicht zur Prüfung der Normenvorgaben und ihrer Gültigkeit für den konkreten Anwendungsfall.

5.5 Betonpflastersteine und Betonplatten

Für die Unterscheidung zwischen „Platte“ und „Stein“ gilt folgende Begriffsbestimmung: Das Verhältnis der Abmessungen Länge (l) und Dicke (d) ist maßgebend, wobei keine scharfe Abgrenzung möglich und der Übergang fließend ist. Betonkörper mit einem Verhältnis $l:d < 2,5$ werden als Steine, mit $l:d > 2,5$ als Platten definiert. Die Steindicken liegen für Deckwerke i.d.R. bei 16 bis 18 cm. Die Steingröße kann dadurch eingeschränkt werden, dass der Stein „handlich“ sein soll und noch von zwei Mann verlegt werden kann. Das Einzelgewicht darf deshalb 50 kg nicht überschreiten.

Betonpflastersteine werden werkmäßig aus hochwertigem Beton hergestellt. Sie werden zum Bau von Deckwerken ohne oder mit Verbund untereinander (horizontal und/oder ver-

Tab. C 13: Nachbehandlungsverfahren für Beton in Abhängigkeit von der Oberflächen-/Lufttemperatur

Zeile	Art		Maßnahmen	Temperatur in °C					
				unter -3	-3 bis +5	+5 bis +10	+10 bis +15	+15 bis +25	über +25
1	Mit wasserdampfdichter Folie abdecken, Film aus Curingmittel aufsprühen	+ mit Wasser benetzen	Abdecken bzw. Film aufsprühen und Nässen zusätzlich: – Holzschalung nässen – Stahlschalung vor Sonne schützen – freie Betonoberflächen in der Schalung abdecken/nässen					(X) ²	X
2			Abdecken bzw. Film aufsprühen ggf. zusätzliche Maßnahmen wie in Zeile 1			X	X	X	
3		+ Wärmedämmung	Abdecken bzw. Film aufsprühen und Wärmedämmung auflegen Verwendung wärmedämmender Schalung (z. B. Holz) sinnvoll, Stahl- schalung mit Dämmmatten abhängen		X ¹				
4			Abdecken und Wärmedämmung auflegen; Umschließen des Arbeits- platzes (Zelt), ggf. Beheizung (z. B. Heizstrahler) zusätzlich: Betontemperatur mindestens 3 Tage > +10° halten	X					
5	mit Wasser benetzen, fluten		ständig sichtbaren Wasserfilm auf der Betonoberfläche vorhalten			(X)	X	X	

- 1 nicht benetzen; Tau-/Regenwasser fernhalten
- 2 bei ungünstigen Bedingungen (z. B. starker Wind) und Expositionsclassen XM, XD, XS sinnvoll

Tab. C 14: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen¹ ohne genaueren Nachweis der Festigkeit im oberflächennahen Bereich (alle Expositionsclassen²)

Oberflächentemperatur ³ ϑ [°C]	Festigkeitsentwicklung des Betons ⁴ $r = f_{cm\,2} / f_{cm\,28}^5$			
	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
≥ 25	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5^6$	3	6	10	15

- 1 Nachbehandlungsdauer bei Verarbeitbarkeitszeit > 5 h angemessen verlängern.
- 2 Für Expositionsclassen XM Werte verdoppeln.
- 3 Anstelle Oberflächentemperatur des Beton darf Lufttemperatur angesetzt werden.
- 4 Aus Mittelwerten der Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen, ermittelt nach DIN 1048-5, entweder bei der Eignungsprüfung oder aus bekanntem Verhältnis von Betonen vergleichbarer Zusammensetzung (gleicher Zement, gleicher Wasserzementwert).
- 5 Zwischenwerte dürfen ermittelt werden.
- 6 Nachbehandlungsdauer bei Temperaturen < 5°C um Zeit der Temperaturen < 5°C verlängern.

Tab. C 15: Einstufung von Meerwasserbauwerken aus Beton und Stahlbeton

Wasserbau		Chlorid	Chlorid Meer	Frost	Frost Taumittel	Chemisch. Angriff	Ver. schleiß	Mindestdruckfestigkeitsklasse	Betondeckung	Überwachungs-kategorie	Spezielle Hinweise, Regelwerke
Bauteile im Meerwasser	XO ⁵	XC 1 2 3 4	XD 1 2 3	XS 1 2 3	XF 1 3 2 4	XA ⁷ 1 2 3	XM 1 2 3		C _{min} ⁴ [mm]	ÜK ²	
	a	x		x		x		C 30/37 (LP) C 35/45	40	2	WA ⁸
	b bewehrt	x		x		x	x	C 30/37 (LP) ⁶ C 35/45	40 40	2 2	
2 Sperrwerksohle	c bewehrt	x		x		x	x	C 35/45	40	2	WA ⁸ mit Verschleißschicht (ohne Hartstoffe)
3 Schleusen-, Molenwände, Kaimauern	a bewehrt	x x x		x x x		x x x	x x x	C 35/45 C 30/37 (LP) ⁶ C 35/45	40 40 40	2 2 2	WA ⁸
4 Schleusen- u. Molenplattformen, Kaimauerkronen mit Tausalz	a bewehrt	x	x	x		x	x	C 30/37 (LP) ⁶	40	2	WA ⁸
5 Befahrene Hafenflächen, Betonböden im Freien ⁹ mit Tausalz, Einzellasten, Radlasten Q < 80 kN	a unbewehrt				x		x	C 30/37 (LP) ⁶	–	2	WA ⁸ Biegezugfestigkeit ≥ 5,5 N/mm ²

2 Soweit nicht aufgrund anderer Randbedingungen eine andere Überwachungskategorie maßgebend ist.
4 Nach ZTV-W, LB 215 „Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton“, gilt unabhängig von der Expositions-kategorie c_{min} > 50 mm; siehe auch DIN 1045-1, Abschn. 6.3 Tafel 4 und Absätze (7) und (10).
5 a – Sprühnebelbereich, b – Wasserwechselzone, Gezeitenzone und Spritzwasserbereich, c – Unterwasserbereich.
6 Gemäß DIN 1045-2, Tab. F 3.1 bis F 3.3 ist bei Verwendung von CEM III/B, w/z ≤ 0,45 und z ≥ 340 kg/m³, Mindestfestigkeitsklasse C 35/45 ohne Luftporen möglich.
7 Ein chemischer Angriff durch Sulfat ist in der Festlegung anzugeben.
8 Feuchtigkeitsklasse nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.
9 Für Bauteile in Küstennähe gilt zusätzlich: XS 1, C 30/37, c_{min} = 40 mm, Überwachungskategorie 2.

tikal) und zur Befestigung von Deichwegen und Deichrampen verwendet. Betonzusammensetzung (niedriger w/z-Wert, hoher Zementgehalt, steife/sehr steife Konsistenz) und die herstellungsbedingt intensive Verdichtung ergeben eine hohe Rohdichte, Druckfestigkeit und einen hohen Verschleißwiderstand. Der hohe Widerstand gegen Frosttausalzangriff wird ohne Zusatz von Luftporenbildnern erzielt. Die Form und die geringen Abweichungen von den Sollmaßen ermöglichen die lückenlose Deckung unterschiedlich geformter Böschungsflächen. Die zulässigen Abweichungen betragen ± 3 mm für das Längen- und Breitenmaß und ± 5 mm für das Höhenmaß. Die Einzel- und Flächengewichte richten sich nach der örtlichen Beanspruchung.

Über die Forderungen von Abschn. 5.4 hinaus muss die Druckfestigkeit jedes Steines bei Auslieferung, spätestens aber nach 28 Tagen, mindestens 60 N/mm² betragen. Der Beton der Platten muss den Anforderungen der Abschnitte 5.3 und 5.4 entsprechen. Großformatige Platten sind i.d.R. bewehrt und nach DIN 1045-1 bemessen. Die Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Verlegung sollte mindestens 35 N/mm² betragen, um eine ausreichende Kantenfestigkeit zu garantieren. Die bewehrten, z. B. auf Container-Umschlagflächen verlegten Betonplatten müssen den Expositionsclassen XC4, XD3, XS3, XF4, XM1 ...XM3 (je nach Beanspruchung durch die Hebezeuge) und XA2 (bei Brackwasser XA3) entsprechen. HS-Zement ist erforderlich.

5.6 Unterwasserbeton

Unterwasserbeton wird i.d.R. als Frischbeton, gelegentlich auch als Fertigteil eingebaut. Tab. C 16 gibt eine Übersicht über Betonarten und Einbauverfahren. Die wichtigsten Voraussetzungen zur Erreichung der angestrebten Betonqualität und der Einbau werden für die Tab. C 16, Zeile 4 bis 6 genannten Verfahren in diesem Abschnitt und in den Abschnitten 5.7 und 5.8 erläutert.

Tab. C 16: Einbauverfahren für Unterwasserbeton und Unterwassermörtel

	Betonart	Einbaumethode
1	Betonfertigteile	– Absenken und Stapeln der Bauteile – Verbinden der Bauteile
2	Frischbeton verpackt in Geokunststoffen	Absenken und Stapeln der Elemente
3	Mörtel	Injektion in bereits eingebaute geotextile Matten und Schläuche
4	Frischbeton	– Schüttrohr-Verfahren – Pump-Verfahren – modifizierte Schüttrohr-Verfahren – Kübel-Verfahren – freier Absturz durchs Wasser von besonders zusammengesetztem Beton (z. B. Sibo-Beton „Hydrocrete“)
5	Ausgussbeton	Injektion des Mörtels in das bereits eingebaute Korngerüst (Colcrete-Verfahren u. a.)
6	Teilverguss von Schüttsteindeckwerken	– Verklammerung mit Zementmörtel – Verblockung mit Beton 0/8 mm

Beton, der über Wasser fertig gemischt wird und unter Wasser eingebracht werden muss, ist im Allgemeinen nach DIN 1045-2, Abschn. 5.3.4, als Unterwasserbeton herzustellen. Er kann nach Tab. C 16 z. B. mit Schüttrohren, modifizierten Verfahren oder Krankübeln eingebracht werden.

Die unterschiedlichen Einbauverfahren sind wie folgt charakterisiert:

Schüttrohr- und Pump-Verfahren (auch Contractor-Verfahren genannt): Es werden vertikal angeordnete Schüttrohre von im Allgemeinen 20 bis 30 cm Durchmesser, das entspricht dem achtfachen Größtkorndurchmesser, im Abstand von maximal 4 bis 6 m an einer Arbeitsbühne o. ä. fixiert, wobei unterschiedliche Systeme eingesetzt werden. Ein starres Rohr wird dem Arbeitsschritt folgend immer mehr über die Arbeitsbühne hinausgetragen. Gegliederte Rohre werden jeweils um ein Glied gekürzt, Teleskoprohre ineinander geschoben. Das Rohrende muss während des Betonierens ständig mindestens 0,5 bis 1 m im bereits ausgelaufenen Frischbeton eintauchen und mit der Steighöhe des frischen Betons angehoben werden. Ein Ventil oder ein anderes Hilfsmittel zum Verschließen des Rohrendes ist zweckmäßig, um vor Betonierbeginn zu verhindern, dass Wasser in das Rohr eindringt. Andernfalls ist ein Kunststoff- oder Papierpfropfen auf den Wasserspiegel im Rohr zu platzieren, der durch das Gewicht des eingefüllten Betons nach unten und schließlich aus dem Rohr gedrückt wird. Beim Betonieren mit einer Betonpumpe wird an den Verteilerschlauch ein Schüttrohr angeflanscht, das länger als die Wassertiefe misst. Während des Betonierens ist besonders darauf zu achten, dass das Rohrende nicht seitlich ausweicht.

Aus dem Schüttrohr-Verfahren wurden verfeinerte, modifizierte Verfahren entwickelt, von denen eines hier beschrieben wird: Die *Hydroventilmethode*. Meistens trägt ein über Wasser längs- und querverfahrbarer Wagen einen flexiblen Kunststoffschlauch und einen zylinderförmigen Schild an seinem unteren Ende. Der Beton wird durch den vertikal hängenden Schlauch gefördert, der vor der Füllung mit Beton durch den Wasserdruck zusammengedrückt und dadurch geschlossen wird. Sobald das Gewicht der Füllung ausreicht, den Schlauch auseinander zu drücken, gleitet der Beton ohne Entmischung und ohne Kontakt mit dem Wasser nach unten. Hinter einem Betonschub wird der Schlauch durch den Wasserdruck wieder zusammengedrückt, bis die nächste Betonmenge abwärts gleitet. Der Schild befindet sich auf der Ebene der gewünschten Schütthöhe und gewährleistet die Einhaltung dieser Höhe. Auf diese Weise lassen sich Betonbeläge mit relativ geringen Dicken-toleranzen herstellen.

Betonieren mit Transportkübel: Der über Wasser gefüllte Betonkübel wird unter Wasser abgesenkt und auf den Boden oder den bereits eingefüllten Beton entleert. Der Kübel sollte immer vollständig gefüllt sein, langsam abgelassen und hochgezogen werden, in die freie Frischbetonoberfläche eindringen und die sich einstellende fortschreitende Betonböschung von unten her aufbauen. In der Regel werden Spezialekübel mit oberer Abdeckung, einem das Auslassventil umgebenden senkrecht stehenden Schutzblech, das in die Frischbetonoberfläche eindringt, und einer hydraulischen Ventilsteuerung eingesetzt.

Bei all diesen Einbauverfahren muss der Beton als zusammenhängende Masse fließen, damit er auch ohne Verdichtung ein geschlossenes Gefüge erhält. Die Sieblinie der Gesteinskörnung soll im Bereich 3 verlaufen und einen ausreichend großen Mehlkorngehalt aufweisen (s. Tab. C 7), der den sonst höchstzulässigen Mehlkorngehalt von 550 kg/m^3 übersteigen darf. Das Ausbreitmaß soll 40 bis 50 cm aufweisen (entspricht dem oberen Bereich der Konsistenzklasse von F 3 bis zu dem unteren von F 4). Der erforderliche Zusammenhalt und das zu gewährleistende dichte Gefüge verlangen einen hohen Zementgehalt von $\geq 350 \text{ kg}$. Um den Wassergehalt zu reduzieren und gleichzeitig eine gute Fließfähigkeit herzustellen, wird die Anwendung eines Fließmittels empfohlen.

Weitere Möglichkeiten eines Unterwasserbetons bieten der Einbau von Ausgussbeton z. B. nach dem Colcrete-Verfahren (s. Abschn. 5.7), die Verlegung mit Beton gefüllter Säcke aus Geokunststoffen, die Füllung bereits verlegter geotextiler Matten und Schläuche mit Mörtel oder Beton (MONNET, W.; DARTSCH, B. u. WEHEFRITZ, K. W., 1980) und die Absenkung und Verbindung vorgefertigter Betonbauteile unter Wasser. Auf Einzelheiten zu diesen Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet.

Die Qualität des Unterwasserbetons hängt nicht allein vom Mischungsaufbau, sondern wesentlich vom Einbau-Verfahren und der Sorgfalt beim Einbau ab. Als Beurteilungskriterien sind im Allgemeinen Prüfungen der Druckfestigkeit und der Homogenität an Bohrkerne vorzunehmen.

Freier Absturz des Betons durchs Wasser: Durch spezielle Zusätze und gezielte Zusammensetzung des Betons lässt sich ein Frischbeton herstellen, der, ohne sich zu entmischen, auch mehrere Meter frei durch stehendes Wasser geschüttet werden kann. Dies ist ein Sonderbeton, bei dem die Eigenschaften stets im Einzelfall nachzuweisen und die Einbaumethoden exakt festzulegen sind. Bei bestimmten Anwendungsfällen (z. B. Steinverguss unter Wasser) ist die Dosierung der Einbaumenge mit Hilfe einer schwimmenden Palette möglich, die durch lamellenartige Verschlüsse den Beton zuverlässig verteilt (Gewatech, Grund- und Wasserbau GmbH, Osnabrück).

5.7 Ausgussbeton

Unter Ausgussbeton wird eine Arbeitstechnik verstanden, bei der zuerst die groben Gesteinskörnungen eingebaut und danach die Hohlräume des Gesteinsgerüsts mit Zementmörtel ausgefüllt werden. Die Herstellung eines gefügedichten Ausgussbeton-Bauteils erfordert besondere Erfahrung bei der Mörtelherstellung und beim Injizieren oder Vergießen der Hohlräume. Die Eigenschaften des Mörtels müssen den Anforderungen nach Abschn. 5.4 entsprechen. Der Mörtel für Ausgussbeton muss sich gut pumpen lassen und darf kein Wasser absondern. Die Verarbeitung muss beendet sein, bevor der Zementleim des Mörtels ansteift und zu erstarren beginnt. Beim Colcrete-Verfahren werden die Anforderungen an den Mörtel durch die Mischart in Sondermischern mit großer Drehzahl, bei anderen Verfahren durch die Zugabe spezieller Zusätze erreicht. Der Frischmörtel ist fließfähig und unempfindlich gegen das Auswaschen von Feinstanteilen; der erhärtete Mörtel besitzt einen hohen Wassereindringwiderstand und einen hohen Widerstand gegen Frostangriff bei Meerwasserbauteilen in der Wechselzone (XF4!). Der gute Zusammenhalt und das schnelle Ansteifen nach der Verarbeitung ist besonders bei Arbeiten in der Wechselzone des Tidebereichs günstig und ermöglicht auch das Arbeiten bei geringen Fließgeschwindigkeiten. Die Verarbeitung erfolgt über und unter Wasser über Injektionslanzen, die vor dem Einbau der Gesteinskörnung positioniert werden. Die Lanzen müssen bis zur Sohle des Bauteils reichen, damit der Mörtel mit langsam steigendem „Mörtelspiegel“ das Wasser aus den Hohlräumen restlos verdrängen und die Gesteinskörner (Grobkies, Schotter, Steine) vollständig umhüllen kann. Bei Arbeiten im Trockenen wird in gleicher Weise verfahren, um Lufteinschlüsse im Steingerüst auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Schüttung soll aus einem Haufwerk bestehen, das keine Korngruppen unter 32 mm enthält. Das Größtkorn des Mörtels darf höchstens 1/10 des Kleinstkorns der Schüttung betragen. Mit der gleichen Injektionstechnik können Steinschüttungen (z. B. Wasserbausteine der Klasse 0 oder I) für Sohlpanzerungen oder dicke Deckwerke hergestellt werden. Dabei gilt die gleiche Regel: Größtkorn des Mörtels $\leq 1/10$ des Kleinstkorns der Schüttung.

Bei größeren Entfernungen wird mit handelsüblichen Mörtel- und Betonpumpen durch 2-Zoll-Rohre gefördert und mit 1,5-Zoll-Injektionsrohren eingebracht. Bei Unterwasser-Injektionsarbeiten wird die Mörtelspiegelhöhe im Allgemeinen über Schwimmer in zusätzlich eingebauten Standrohren oder durch elektrische Widerstandsmessung bestimmt. Die Fließfähigkeit des Frischmörtels wird mit einem Auslaufrichter, die Mörtelfestigkeit an Prismen geprüft.

5.8 Teilverguss von Steinschüttungen

Beim Teilverguss ist es das Ziel, die Einzelsteine der Steinschüttung z. B. eines Deckwerks dadurch in ihrer Lage zu stabilisieren, dass Mörtel oder Beton mit kleinem Größtkorn alle Steine an der Oberfläche und möglichst viele Steine innerhalb der Schüttung punktuell miteinander verbindet.

Gleichzeitig sollen im Gegensatz zum Vollverguss (oder Ausgussbeton) möglichst *wenige* Hohlräume geschlossen werden, um ein offenes durchströmbares und ökologisches Deckwerk zu erhalten, das Pflanzen und Tieren die Besiedlung ermöglicht und ihnen Schutz bietet (s. Abb. C 1).

Zur Vermeidung von Ausspülungen des anstehenden Bodens wird ein dauerhaft wirksamer mineralischer oder geotextiler Filter eingebaut. Die gute Haftung des Mörtels an den Steinen bewirkt auch bei geringen Mörtelmengen eine sichere Verklammerung, so dass die Einzelsteine von den benachbarten mit gesichert werden. Verguss und Verklammerung werden über und unter Wasser ausgeführt. In der Wasserwechselzone und unter Wasser ist die Unempfindlichkeit des Frischmörtels gegen Auswaschung der Feinstanteile von ausschlaggebender Bedeutung für die Verklammerungswirkung. Das Merkblatt „Anwendung von hy-



Abb. C 1: Verklammertes Deckwerk (Colcrete-Verfahren)

draulisch und bituminös gebundenen Vergussstoffen zum Teil- und Vollverguss von Steinschüttungen an Wasserstraßen“ (MAV, 1990) legt die technischen Anforderungen an Ausgangsstoffe und Bauausführung für den Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes fest. Die „Empfehlungen für die Verklammerung von Uferschutzwerten und Sohl-sicherungen (EVU, 1990)“ fassen die mit dieser Bauweise gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse zusammen, um sie für die Planung und Bauausführung verfügbar zu machen. Einzelheiten enthalten die Empfehlungen G 2002 „Seedeiche und Tidestromdeiche“, Abschn. 4.3.6.3 und 4.3.6.4.

Seit einigen Jahren wird an Binnenwasserstraßen ein neu entwickeltes Teilverguss-System, die sog. Verblockung, angewendet (MÖBIUS, W. u. MARTINI, J., 1996 und LEHMANN, K., 1998). Im Vergleich zur *Verklammerung*, bei der Verklammerungsmörtel möglichst gleichmäßig über die Deckwerksfläche dosiert ist, wird bei der *Verblockung* eine dosierte Betonmenge (Größtkorn 8 mm) punktuell und unter Druck in das Schüttsteingerüst eingebracht (Abb. C 2 und C 3). Das Verblockungssystem stellt durch Verbindung einer Vielzahl von Steinen innerhalb der Schüttung einen Block her, der durch sein großes Gewicht eine wesentlich größere Lagestabilität aufweist. Die Lagestabilität dieser Blöcke wird zusätzlich durch die Verzahnung mit den benachbarten Blöcken gesichert.

Messungen an Versuchsdeckwerken haben ergeben, dass durch die Verblockung Steinpakete entstehen, die etwa dem 7-fachen Einzelgewicht eines Steines entsprechen: die erforderliche Kraft zum Herausbrechen eines derartigen Blockes aus dem Verbund des Deckwerkes erfordert aber die ca. 20-fache Kraft. Andererseits bewirken die vergussarmen Bereiche, dass das Deckwerk eine ausreichende Flexibilität aufweist, so dass es auch kleinräumigen Be-



Abb. C 2: Verblockung: Deckwerk mit vergussarmen Zonen (Verblockungssystem Möbius)

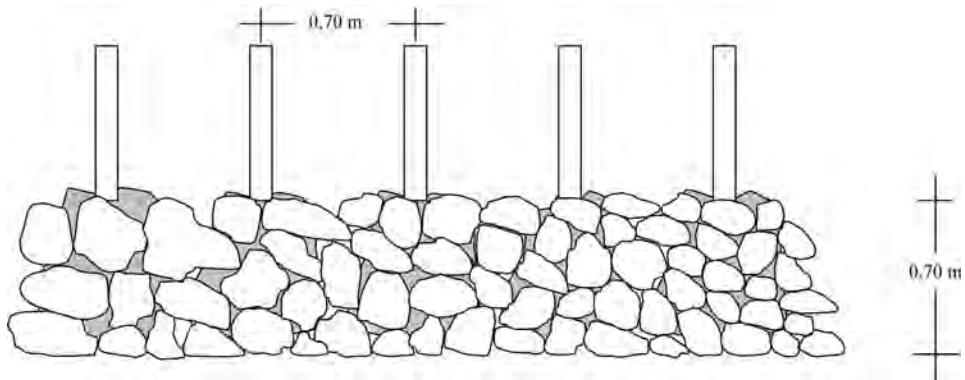


Abb. C 3: Punktueller oder streifenförmiger Verguss zur Verbesserung des Bruchverhaltens bei hydraulisch gebundenen dichten Vergussstoffen (Verblockung Möbius)

wegungen des Untergrundes folgen kann, ohne seine Funktion als schützende Deckschicht zu verlieren.

Die Ausgangsstoffe des Betons werden elektronisch abgewogen, gemischt und in das Zwischensilo der Pumpeneinheit entleert. Mit der Betonpumpe wird der Frischbeton über Stahlrohrleitungen der Einbaueinheit zugeführt und – über computergesteuerte Auslassventile exakt dosiert – in das vorab von Ablagerungen freigespülte Steingerüst eingebracht (Abb. C 3). Die Einbaueinheit wird über eine in Längs- und Querrichtung verfahrbare Kranbahnkonstruktion auf einer Pontonanlage mit Hilfe einer Computersteuerung in die jeweilige Einbauposition gebracht. Nach Erreichen der Position wird die Einbaueinheit senkrecht auf die Deckwerksoberfläche verfahren, bis die Austragsschläuche Kontakt mit den Steinen haben und der Vorschub automatisch beendet wird. Während der Annäherung der Einheit an das Deckwerk erfolgt die o. g. Freispülung der Steinschüttung. Unmittelbar anschließend erfolgt der Einbau über die Ventilstutzen. Sind alle Ventile (oder eine individuell von Hand eingestellte Geometrie) angesteuert worden, wird die Einbaueinheit angehoben, verfahren und der Vorgang beginnt von neuem.

Die vorgestellte Verblockung von Wasserbausteinen ($\geq$ Schüttsteinklasse III) bewirkt, dass einerseits durch den Wechsel von systembedingten vergussarmen und vergussreichen Einbauzonen die gewollte Flexibilität des Deckwerkes erreicht, andererseits durch die steifen Verblockungselemente und ihre gegenseitige Verzahnung eine große Lagestabilität des Deckwerkes erzielt wird. Die Beton-Einbaumenge beträgt in der Regel 60 bis 65 dm³/m².

5.9 Bodenverfestigung mit Zement

Durch eine Verfestigung des Bodens mit Zement wird seine Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastungen, insbesondere gegen Sandschliff, Eisgang, Wellenschlag und strömendes Wasser, erhöht, so dass der Boden dauerhaft tragfähig und frostsicher wird. Die Bodenvertiefung wird als Tragschicht für Deckwerke verwendet, kann aber auch bei Dämmen zur lagenweisen Verfestigung des gesamten Dammquerschnitts und als Böschungsschutz durch Verfestigung der äußeren Zone genutzt werden.

Die Anforderungen an die zur Verfestigung vorgesehene und an die verfestigte Schicht sowie deren Herstellung und Prüfung sind im Einzelnen im „Vorläufigen Merkblatt für Bodenverfestigung mit Zement im Wasserbau“ (FIZ, 1978) niedergelegt.

5.10 Sand-Zement-Schüttsteine

Sand-Zement-Schüttsteine werden hergestellt, indem die einzelnen Lagen des verdichteten Boden-Zementgemisches (s. Abschn. 5.9) blockförmig zerschnitten werden. Nach ausreichender Erhärtung werden die so entstandenen Steine aufgenommen und verbaut. Sand-Zement-Steine können vor allem für Dammschüttungen verwendet werden, die nur im Bauzustand starker Erosion ausgesetzt und späterhin überdeckt sind, z. B. bei Deichschlüssen, Priedurchdämmungen und Kolkverbau. Einzelheiten zu Anforderungen, Herstellung und Prüfung sind im Merkblatt (FIZ, 1978) enthalten.

6. Asphalt

6.1 Allgemeines

Asphalt besteht aus einem Gemisch von Bitumen und Mineralstoffen. Er ist ein thermoplastischer Baustoff, dessen mechanische Eigenschaften temperatur- und zeitabhängig sind. Diese Eigenschaften ermöglichen begrenzte und dann schadlose Anpassungen des Deckwerks an Setzungen der Unterlage. Der Asphalt wird im Allgemeinen heiß eingebaut.

Entsprechend den Anforderungen an das Bauwerk werden dichte und durchlässige Baustoffe eingesetzt. Dichte Deckschichten bestehen aus Asphaltbeton (Mineralzusammensetzung nach dem Hohlraum-Minimumprinzip) oder aus Steinlagen, deren Hohlräume mit Asphaltmastix voll vergossen werden. Sie sind alterungsbeständig, da die Witterung nur auf den unmittelbaren Oberflächenbereich Einfluss nehmen kann. Auch wenige mm dicke Schichten aus reinem Bitumen sind dicht. Offene Bauweisen bestehen aus Steinlagen, deren Hohlräume nur teilweise mit Asphaltmastix verfüllt sind, oder aus hohlraumreichen Bitumen-Mineralstoff-Gemischen. Letztere müssen um das gröbere Gesteinskorn einen dicken Bitumenfilm aus Bitumen oder einem Bitumen-Feinstoffgemisch erhalten, der gegenüber Durchtritt von Luftsauerstoff und Wasser dicht ist. Eine möglicherweise begrenzte Alterungsbeständigkeit hohlraumreicher Bitumen-Mineralstoff-Gemische ist in die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Gesamtbauwerks einzubeziehen.

Die Baustoffe, ihre Eigenschaften und Zusammensetzung, die Beständigkeit gegenüber allen äußeren Einflüssen, die Prüfung sowie die Anwendung und die Einbauverfahren sind ausführlich in den „*Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltbauweisen im Wasserbau*“ (EAAW 83/96) beschrieben, die allen Ausschreibungen zugrunde gelegt werden sollten. Die 4. Ausgabe 1983, 2. Auflage 1996, befindet sich zzt. in einer grundlegenden Neubearbeitung. Sie wird später die 4. Ausgabe ersetzen. Hier wird daher nur eine kurze Beschreibung der verschiedenen Stoffe gegeben. Weitere Prüfverfahren sind in DIN 1996 für den Asphalt sowie in DIN EN 1426, DIN EN 1427 und DIN EN 12592 ff. für das Bitumen aufgeführt.

6.2 Mineralstoffe

Verwendet werden Natursteinschotter, -splitte und -brechsande, Steinmehle, Kiese und Natursande. Sie sollen weder verwittert noch quellfähig sein, dagegen frostbeständig, sauber, von gleich bleibender Qualität und Kornzusammensetzung, ohne größere Mengen plattiger Anteile und für Asphaltbeton-Deckschichten im Wesentlichen flintfrei.

Gesteinsmehle bestehen überwiegend aus Korn kleiner 0,09 mm, das man Füller nennt. Sie bestimmen wegen ihrer großen Oberfläche weitgehend den Bindemittelbedarf und damit die Verarbeitbarkeit und teilweise auch die Stabilität des Gemisches.

6.3 Bindemittel

Als Bindemittel wird im Allgemeinen ein Straßenbaubitumen nach DIN EN 12591 eingesetzt, das durch schonende Destillation aus Erdöl hergestellt wird (DIN EN 12597). Es ist in hygienischer Hinsicht unbedenklich. Die Hauptsorten sind B 70/100 sowie B 160/220 und B 50/70. Härtere und weichere Sorten (B 30/45 bis B 20/30 bzw. B 500/650) sowie polymermodifizierte Bitumen mit gleicher oder ähnlicher Nadelpenetration (TL-PmB) können für besondere Beanspruchungen zweckmäßig sein, desgleichen Oxidationsbitumen, hochviskoses Fluxbitumen und Kaltbitumen (die als Fluxmittel im Wasserbau aus hygienischen Gründen nur Erdölfraktionen enthalten sollten) sowie Bitumenemulsionen.

6.4 Asphaltbeton, Gussasphalt und Sandasphalt

Die Mineralstoffe werden nach dem Hohlraum-Minimumprinzip zusammengesetzt und sollen etwa innerhalb der Sieblinienfläche der „*Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltbauweisen im Wasserbau*“ (EAAW 83/95) liegen (Abb. 5). Dort werden auch die Bindemittelmengen und die Anforderungen, insbesondere an den Hohlraum des verdichteten Gemisches, angegeben.

Deckschichten sind wasserdicht, wenn daraus entnommene Prüfstücke eine Wasseraufnahme im Vakuum von ≤ 2 Vol.-% oder einen berechneten Hohlraum von ≤ 3 Vol.-% (DIN 1996, Teil 8 und Teil 7) aufweisen.

Für Deckwerke und Böschungsbefestigungen oberhalb der Wasserwechselzone sowie für Deichverteidigungswege kann der Hohlraum höher liegen, nämlich bei einer Wasseraufnahme von ≤ 3 Vol.-% oder einem berechneten Hohlraum von ≤ 4 Vol.-%. Im Auge behalten sollte man dabei allerdings die Alterungsbeständigkeit, die möglicherweise durch eine Oberflächenversiegelung verbessert werden muss.

Ein niedriger Hohlraumgehalt gewährleistet nicht nur Wasserdichtigkeit, sondern ist auch wegen der Alterungsbeständigkeit des Bauwerks von wesentlicher Bedeutung. Sind die Hohlräume gering, so hat auch der Luftsauerstoff kaum Zutrittsmöglichkeiten zum Bindemittel im Inneren des Belages selbst; es kann dann auch keine Oxidierung und damit Verhärtung eintreten, die auf lange Sicht die Flexibilität der Decke beeinträchtigen würde.

Tab. C 17 enthält in einer Zusammenstellung Angaben über Kornzusammensetzung und Bindemittelgehalt. Die Kornbereiche lassen sich für besondere Einbauverfahren und Anwendungsbereiche noch durch Einbeziehung größerer Korngruppen erweitern. Sandasphalt und Gussasphalt haben heute im Asphaltwasserbau nur noch in Sonderfällen eine Bedeutung, da sie mit Asphaltbeton in wirtschaftlicher Hinsicht praktisch nicht mehr konkurrieren können.

Asphaltgemische von Bauwerken mit zeitlich begrenzter Nutzung, wie z. B. Deckwerke und Baustraßen, sollten als Ausbauasphalt wiederverwertet werden (DE GROOT u. GRUIS, 1985). Dadurch werden auch Kosten und Deponieraum gespart. Ein Beispiel für eine solche Wiederverwertung von Ausbauasphalt als Baustoff für das Deckwerk der Überschlagsicherung und die Straßenbefestigung des Deichverteidigungsweges ist bei der Vordeichung Hatt-

Tab. C 17: Asphalt: Kornzusammensetzung und Bindemittelgehalt

	Kornbereich mm	Gehalt an Korn > 2 mm Masse-%	Füller- gehalt Masse-%	Bitumen- gehalt Masse-%
Asphaltbeton	0/5, 0/8, 0/11	20 ... 50	10 ... 15	7 ... 9
Asphaltbeton	0/16, 0/22, 0/32	40 ... 60	5 ... 13	5,5 ... 7
Sandasphalt	0/2	0 ... 20	10 ... 20	8 ... 12
Gussasphalt	0/8, 0/11, 0/16	25 ... 40	≥ 20	7 ... 10
Asphaltverguss	Natursand 0/2	teilweise bis 30	10 ... 30	14 ... 20
Mastixschotter ¹	16/22 bis 32/45 ²	80	3	3

1 Auch „offener Steinasphalt“ genannt.
2 Auch größeres Korn kann je nach Verwendungszweck geeignet sein.
3 Das den Schotter oder Edelsplitt als Bindemittelfilm umhüllende „Bindemittel“ hat einen Anteil am gesamten Mastixschottergemisch von etwa 20 M-%. Es besteht aus einem Asphaltmastix mit etwa 66,5 M-% Sand, 16,5 M-% Füller und 17 M-% Bitumen.

stedter Marsch an der Nordseeküste Mitte der 80er-Jahre gegeben. Dort wurden nach eingehender Prüfung der Eigenschaften des Ausbauasphaltes und Erstellung entsprechender Eigenschaftsprüfungen für das Deckwerk bis zu 80 % und für den Deichverteidigungsweg 75 % Altmaterial (Asphaltbeton und Asphalttragschicht) zugegeben (SAGGAU u. STADELMANN, 1989) (s. a. Empf. E, Abschn. 3.5).

6.5 Hohlraumreiche Bitumen-Mineralstoff-Gemische

Sie dienen als Walzunterlage und Ausgleichsschicht gegenüber großkörnigen, nichtgebundenen Mineralschichten oder als Filter- und Dränschichten. Damit können sie bindemittelärmer, grobkörniger und hohlraumreicher als die undurchlässigen Dichtungsschichten oder Deckwerke eingestellt werden. Die Zusammensetzung erfolgt im Allgemeinen in Anlehnung an die Straßenbauvorschriften (ZTV T-StB u. ZTV Asphalt-StB). Für Deckwerke an Seedeichen haben diese Gemische im Allgemeinen keine Bedeutung.

Werden sie jedoch als Drän- und Filterschichten für offene Deckwerke benötigt, so ist für geeignete hohlraumreiche Gemische aus Bitumen und Kies, Splitt, Grobkies und Schotter ein dickerer Bitumenfilm durch Beigabe von Steinmehlen oder Brechsand mit entsprechendem Steinmehlgehalt anzustreben. Diese Gemische werden allgemein Mastixgestein genannt.

Mastixschotter als offenes Deckwerk auf Filterschicht wird in letzter Zeit auch in Deutschland in zunehmendem Maße eingesetzt – insbesondere, wenn das Deckwerk hinter einem weiten Vorland liegt, das die Wellenhöhen deutlich verringert. Es kann dabei gefahrlos durchwachsen werden und ist damit naturfreundlich. Für dessen Zusammensetzung siehe Tab. C 17.

6.6 Asphalt-Eingussmassen

Als Eingussmasse wird ein hohlraumfreies, heißes Gemisch aus feineren Mineralstoffen (Sande und Steinmehle) und Bitumen verwendet. Es ist im heißen Zustand fließfähig, nach dem Erkalten jedoch standfest und kann sich langsamen Bewegungen durch plastische Verformungen angleichen ohne zu reißen. Die Zusammensetzung für die verschiedenen Anwendungsgebiete ist wiederum in den EAAW (1996) festgelegt. Für die Mineralzusammensetzung sind dort Siebflächen angegeben (Abb. C 4). Je nach Größe des zu füllenden Hohlraums werden gröbere Mineralstoffe zugegeben, die für Sonderanwendungen bis zu Korngrößen von 150 mm reichen können.

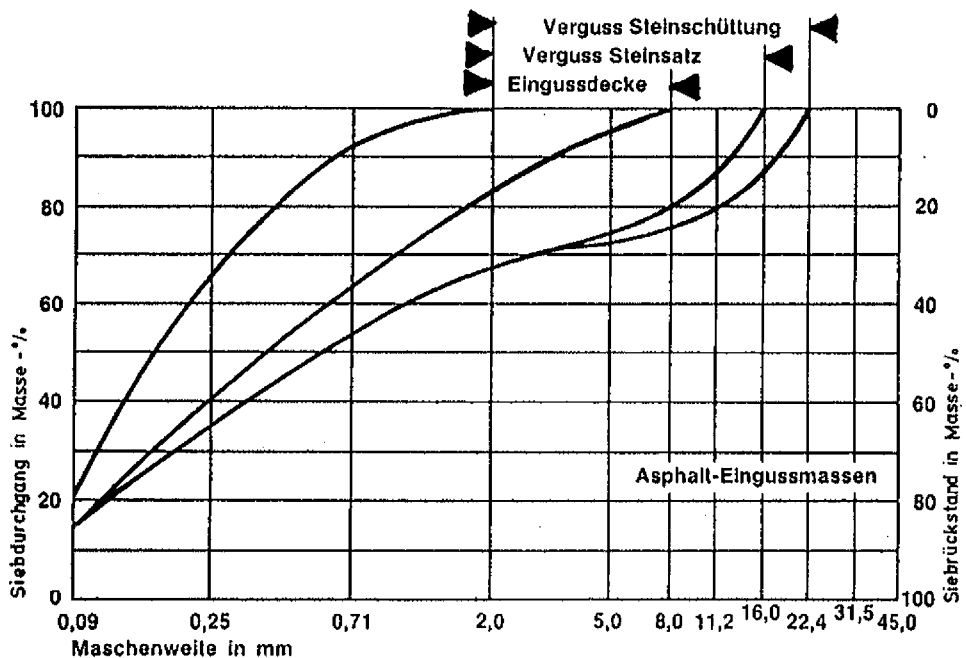


Abb. C 4: Siebflächenbereich für Asphalt-Eingussmassen (Asphaltmastix), (EAAW 83/96)

6.7 Fugenvergussmasse

Für Fugenvergussmassen zum Schließen von horizontalen oder geneigten Fugen zwischen starren Baukörpern sind keine allgemeinen Angaben über ihre Zusammensetzung möglich, da diese entsprechend dem Anwendungsgebiet und den Bedingungen, wie Böschungsneigung, Fugenbreite und -tiefe, sehr unterschiedlich sein können. Es empfiehlt sich, erfahrenen Herstellern von Vergussmassen diese Bedingungen zu schildern und sich geeignete Zusammensetzungen anbieten zu lassen. Für horizontale, dreiecksförmig ausgebildete Fugen eignen sich auch reine Bitumensorten, mit oder ohne Polymerzusatz, die in der Lage sind, sich den jahreszeitlichen Volumenschwankungen ohne Absetzen von den Fugenwänden anzupassen.

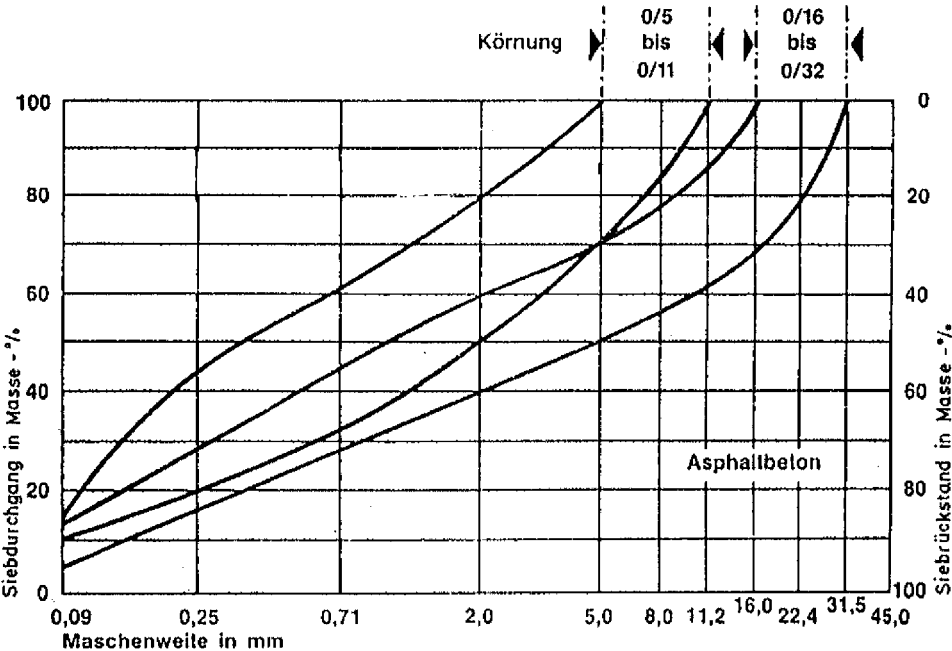


Abb. C 5: Sieblinienbereich für Asphaltbeton (EAAW 83/96)

6.8 Bitumensand

Entsprechend seiner Anwendung als wirtschaftlicher Baustoff für Unterlagen von dichteren Asphaltbelägen und Deckwerken, als Massenbaustoff zum Herstellen von Baukörpern unter Wasser und im Wasserwechselbereich sowie zum Verfüllen von Hohlräumen und als gebundene Filterschicht genügt es, eine Bindung durch geringere Bitumenmengen, etwa 3 bis 5 Masse-%, anzustreben. Der Endhohlraum liegt im Allgemeinen zwischen 20 und 35 Vol.-%. Ist eine gewisse Standfestigkeit erforderlich, so kann die Stabilität des Mischgutes durch Zugabe von Steinmehl verbessert werden. Als Bitumensorte kommt im Allgemeinen ein B 70/100 in Frage.

6.9 Sondergemische

Die Vielzahl der Anwendungsgebiete bedingt, dass außer den oben genannten Baustoffen gelegentlich auch Sondergemische eingesetzt werden. Dazu gehören u. a. bitumenreicher Versiegelungsmastix, Oberflächenbehandlungen mit Heißbitumen oder hochstabilisierten Bitumenemulsionen, Steingerüst-Asphaltbeton und Asphaltmatten. Sie sind größtenteils in den EAAW näher beschrieben worden oder werden von der Industrie für Sonderfälle angeboten.

6.10 Prüfungen

In der Tab. C 18 sind nach den EAAW 83, Teil C, die üblichen Prüfverfahren für Asphaltgemische aufgeführt und Angaben enthalten, wann die Prüfungen durchzuführen sind.

Tab. C 18: Angaben über Eigenschaften von Baustoffen und Baustoffgemischen bzw. Nachweis durch Prüfungen

Bewertung: 1 = erforderlich, 2 = Information, 3 = in Sonderfällen

EP = Eignungsprüfung EüP = Eigenüber- wachungsprüfung KP = Kontrollprüfung	DIN, Merkblätter (MBL) und Technische Lieferbedingungen (TL) der FGSV Abschnitte der EAAW 83	Eingussmassen nach EAAW 83 B 2			Asphaltbeton nach EAAW 83 B 1.3			Hohlraumreiche Bitumen- Mineralgemische nach EAAW 83		
		EP	EüP	KP	EP	EüP	KP	EP	EüP	KP
Mineralstoffe										
Eigenschaften	TL Min-StB									
Prüfungen	TP Min-StB									
Güteüberwachung	RG Min-StB	1			1			1		
Art und Herkunft		1			1			1		
Beurteilung nach Augenschein		1	1		1	1		1	1	
Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen	DIN 52098	1	2		1	2		1	2	
Einzelne Eigenschaften	TL Min-StB	3	3		3	3				
Bindemittel										
Bindemittelsorte	DIN EN 12591	1	2		1	2		1	2	
Eigenschaften des an- gelieferten Bindemittels	DIN EN 1426 DIN EN 1427 DIN EN 12529 ff.	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Asphaltgemische										
Mengenanteile der Lieferkörnungen		1			1			1		
Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches	DIN 1996 Teil 14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bindemittelgehalt	DIN 1996 Teil 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eigenschaften des extra- hiierten Bindemittels ¹	DIN EN 1426 u. 1427 DIN EN 12529 ff.		3	3		2	1		2	1
Rohdichte des Asphalts	DIN 1996 Teil 7				1	1	1			
Raumdichte des Asphalts	DIN 1996 Teil 7	2		2	1	1	1	1		2
Wasseraufnahme ²	DIN 1996 Teil 8				1	1	1			
Berechneter	DIN 1996 Teil 7				1	1	1	1		2
Hohlraumgehalt ²										
Wasserlagerung ³	DIN 1996 Teil 10							1		
Quellversuch	DIN 1996 Teil 9				3	3		3	3	
Dicke des Ausbaustückes						1	1		1	1
Standfestigkeit auf geeigneten Flächen	Abschn. C 9.7.1	3			1			3		
Durchlässigkeit dichter Beläge	Abschn. C 9.7.2					3	3			
Wasserdurchtritt durch offene Beläge	Abschn. C 9.7.3							1		3
Verdichtbarkeit	Abschn. C 9.7.4				1	2	2			
Flexibilität	Abschn. C 9.7.5				3					
Viskosität von Einguss- massen	Abschn. C 9.7.6	3		3						

1 Im Allgemeinen genügt die Bestimmung von Erweichungspunkt RuK und Nadelpenetration.
2 Entweder Wasseraufnahme oder berechneter Hohlraumgehalt.
3 Gilt nur für Bindemittel mit mindestens einer Penetration von 160 [0,1 mm] (B 160/220 und weicher).

7 Geokunststoffe

7.1 Allgemeines

Obwohl Geokunststoffe in Form von z. B. Geotextilien und flächenhaften Dichtungsbahnen seit etwa 1957 im Erd- und Wasserbau eingesetzt werden, sind sie als vergleichsweise neue Baustoffe anzusehen. In den letzten Jahren hat sich ihr Einsatzgebiet ständig erweitert, und ihre Verwendung hat aufgrund technischer und wirtschaftlicher Vorteile gegenüber konventionellen Baustoffen stetig zugenommen. Sie finden Anwendung im Küstenwasserbau, Verkehrswasserbau, Landverkehrswegebau (Gleis-, Straßen- und Tunnelbau), Deponiebau sowie Damm- und Böschungsbau. Ein Gesamtüberblick zu Anwendungen mit Geokunststoffen in der Geotechnik und im Wasserbau ist u. a. in SAATHOFF u. ZITSCHER (2001) veröffentlicht. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über Produktformen der Geokunststoffe gegeben.

Geokunststoffe ersetzen oder ergänzen herkömmliche Bauweisen und Baustoffe und übernehmen dabei in der Kontaktzone von Boden und Wasser im Küstenwasserbau die Funktionen Filtern, Dichten, Trennen, Dränen, Schützen, Verpacken, Bewehren und Erosionsschutz sowie Kombinationen hiervon. Mit Geokunststoffen können technisch und wirtschaftlich vorteilhafte Bauweisen unter Berücksichtigung eines sicheren, kontrollierbaren und kostengünstigen Einbaus entwickelt werden.

Ihre vielseitige Verwendung beruht vor allem darauf, dass durch Formbarkeit, Flexibilität und geeignete Verbindungstechniken die Flächengröße dem Einbauzweck angepasst und erdstoffgefüllte geotextile Säcke, Container oder Schläuche hergestellt werden können. Außerdem ist eine weitestgehende Abstimmung auf gegebene Belastungsgrößen möglich.

Geokunststoffe sind gegen chemische Einflüsse beständig, weisen eine hohe Verrottungsfestigkeit auf und sind infolge ihres geringen Eigengewichtes leicht zu handhaben. Zu beachten sind Gefährdungen der Geokunststoffe durch mechanische Beanspruchungen bei unsachgemäßem Einbau oder bei fehlender Abdeckung durch Vandalismus, Sandschliff oder Treibgut sowie die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung in Abhängigkeit von Rohstoff und Faserfeinheit.

Synthetische Flächengebilde (Geosynthetics oder Geokunststoffe) können zunächst in wasserdurchlässig und wasserundurchlässig eingeteilt werden. Geotextilien und geotextilverwandte Produkte bilden die Gruppe der wasserdurchlässigen Flächengebilde. Dichtungsbahnen (Kunststoffdichtungsbahnen, Geomembranen) und dichtungsbahnverwandte Produkte wie beispielsweise geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) stehen stellvertretend für wasserundurchlässige Flächengebilde.

In SAATHOFF u. ZITSCHER (2001) und ZITSCHER (1989) werden die grundsätzlichen rohstoff- und produktspezifischen Eigenschaften von Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen behandelt, die für die Auswahl und Anwendung von Geokunststoffen berücksichtigt werden müssen (Abb. C 6).

Weiterhin behandeln die Empfehlungen und Merkblätter die besonderen, problemorientierten Anforderungen, die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung sowie die heute üblichen Prüfungen und Regeln zur Dimensionierung. Anwendungen und für Problemstellungen relevante Fragen der Bemessung, der erforderlichen Prüfungen, Anforderungen hinsichtlich der Qualitätssicherung sowie Hinweise zur Bauausführung werden in SAATHOFF u. ZITSCHER (2001), DVWK (1992), BAW-MAG (1993), WILMERS (1994), EBGEO (1997) und EAG-GTD (2002) behandelt.

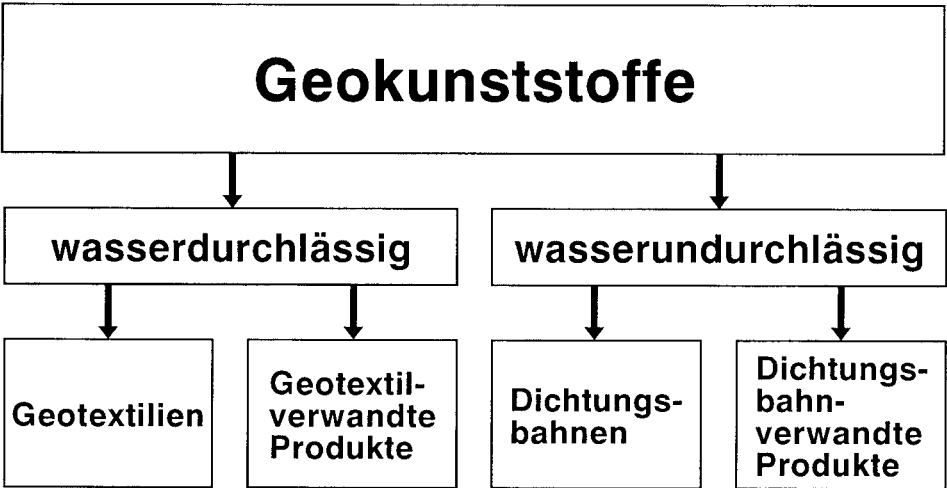


Abb. C 6: Einteilung der Geokunststoffe (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001)

7.2 Rohstoffe

Derzeit sind aufgrund hoher Anforderungen an die Langzeitbeständigkeit die synthetischen Rohstoffe Polyethylen, Polypropylen, Polyester, Polyamid und Polyacrylnitril für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte gebräuchlich. Die wichtigsten Rohstoffeigenschaften sind in Tab. C 19 dargestellt.

Für Kunststoffdichtungsbahnen werden die Rohstoffe Polychloropren-Kautschuk, Isobuten-Isopren-Kautschuk, Polyethylen, chlorsulfoniertes Polyethylen, chloriertes Polyethylen, Ethylen-Copolymerisat-Bitumen, Ethylen-Propylen-Dien-Mixture und Polyvinylchlorid-weich verwendet.

Tab. C 19: Rohstoffeigenschaften (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001)

	Reißfestig- keit * (cN/dtex)	Nassreiß- festigkeit	Kriech- neigung	Verrottungs- beständig- keit	Licht beständig- keit	Beständigkeit gegen Boden- chemikalien
Polyacrylnitril (PAC)	2–4	etwas niedriger	vorhanden	gut	sehr gut	gut
Polyamid (PA)	4–8	10% niedriger (bei größerer Dehnung)	sehr gering	gut	gut	sehr gut
Polyester (PES)	4–8	keine Änderung	sehr gering	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Polyethylen (PEHD)	2,5–5	keine Änderung	sehr stark	sehr gut	nicht aus- reichend	sehr gut
Polypropylen (PP)	4–6	keine Änderung	stark	sehr gut	schlecht	sehr gut

* Bezogen auf das Filament bzw. Spinnfaser, nicht auf das Geotextil; Krafteinheit in Centi-Newton (cN)

7.3 Geotextilien

7.3.1 Allgemeines

Geotextilien sind ebene, durchlässige, polymere (synthetisch oder natürliche) Textilien (Flächengebilde), Vliesstoff oder Gewebe, die bei geotechnischen Anwendungen und im Bauwesen für den Kontakt mit Böden und/oder einem anderen Material verwendet werden (EN ISO 10318, 2001). Auch Maschenwaren wie Fadenlagennähgewirke und Raschelware werden als Geotextilien bezeichnet (weitere Informationen hierzu sind in SAATHOFF u. ZITSCHER (2001) formuliert).

Geotextilien werden neben Sonderformen primär unterteilt in

- Gewebe (gewebtes Geotextil)
- Vliesstoffe (vliesgelegte Geotextilien)
- Verbundstoffe (Geoverbundstoff mit mindestens einer Geotextilkomponente).

7.3.2 Gewebe

Gewebe sind Geotextilien, die durch in der Regel rechtwinklige Verkreuzung von zwei oder mehr Systemen aus Fäden, Fasern, Filamenten, Bändchen oder anderen Elementen hergestellt werden (EN ISO 10318, 2001).

Die Längsrichtung heißt bei Geweben Kettrichtung, die Querrichtung Schussrichtung. Die Gesamtheit der Kettfäden ist die Kette, die Gesamtheit der Schussfäden ist der Schuss. Für Kette und Schuss werden Spinnfasergarne, Multifilamentgarne, Zwirne, Monofilamente, Folienbändchen oder Spleißgarne verwendet – auch in unterschiedlicher Kombination. Als Kett- und Schussmaterial können gleiche oder verschiedene Garnarten verwendet werden, wie zum Beispiel Multifilamentgarne aus Polyester, Polypropylen, Monofilamentgarne aus Polyethylen, Folienbändchen und Spleißgarne aus Polyethylen und Polypropylen (Abb. C 7).

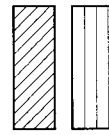
Abb. C 7 zeigt eine Auswahl gebräuchlicher Gewebe. Dabei werden Gewebe mit großer Öffnungsweite (d. h. wenig Kett- und Schussfäden je Längeneinheit) Gittergewebe genannt. Sie sind in der Regel mit einer PVC-Ummantelung schiebefest (d. h. Fixierung der Maschenweite) ausgerüstet.

Die Art der Verkreuzung/Verwebung der Fäden wird Bindung genannt. Die Art der Bindung kann die technischen Eigenschaften erheblich beeinflussen. Als Bindungsarten für geotextile Gewebe werden in der Regel Leinen- (im Textilwesen Leinwandbindung genannt) und Körperbindung angeboten (Abb. C 8). Die Leinenbindung ermöglicht die Fertigung besonders fester, die Körperbindung die Fertigung besonders dichter Gewebe. Zur Erhöhung der Weiterreißfestigkeit sind bei Leinen- und Körperbindung Verstärkungen möglich, indem etwa jeder zehnte Kett- und Schussfaden doppelt vorhanden ist. Diese Gewebe werden als Karogewebe bezeichnet.

Gewebe werden bevorzugt, wenn hohe Zugfestigkeiten gefordert werden. Sie eignen sich bei statischer Belastung auch als Filter für den Einsatz auf ungleichkörnigen Böden, da sich hier ein stabiler Sekundärfilter im Boden aufbauen kann. Bei dynamisch belasteten Filtern ist diese Randbedingung zumeist nicht gegeben. Die Randbedingungen für Filteranwendungen sind in DVWK (1992) und BAW-MAG (1993) beschrieben.

Multifilamentgarne

bestehen aus einer Anzahl
miteinander gedrehter oder
ungedrehter Filamente



**Polyester
Polypropylen
(Polyamid)**

Monofilamentgarne

sind Drähte aus Kunststoff
(Durchmesser > 100 μ)



Polyethylen

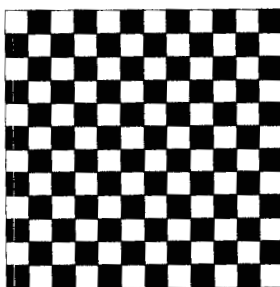
Folienbändchen

werden durch Schneiden
von Folien in schmale
Streifen hergestellt

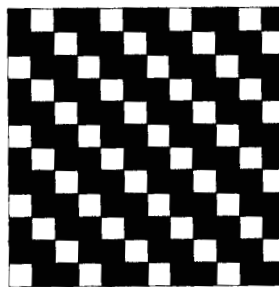


**Polyethylen
Polypropylen**

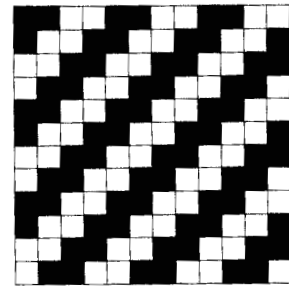
Abb. C 7: Für Gewebe bevorzugt verwendete Garnarten und Rohstoffe (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001)



Leinenbindung



Dreibindiger Körper



Vierbindiger Körper

Abb. C 8: Bindungspatronen von Geweben (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001)

7.3.3 Vliesstoffe

Vliesstoffe sind flexible Flächengebilde, die nach EN ISO 10318 durch Verfestigung von Faservliesen hergestellt sind. Diese bestehen aus flächenhaft aufeinander abgelegten, ungeordneten Spinnfasern oder Filamenten.

Spinnfaser-Vliesstoffe werden aus feingekräuselten Spinnfasern (oftmals früher Stapelfasern genannt) und anschließender Verfestigung gefertigt. Die Faserablage kann mechanisch auf Kardiermaschinen (z. B. Krempeln) oder auf aerodynamischem Wege erfolgen. Dickenunterschiede (Wolkigkeiten) lassen sich durch sorgfältige Krempeleneinstellung weitgehend vermeiden.

Filament-Vliesstoffe werden durch Ablegen und Verfestigen endlos aus Spinndüsen gewonnener, nicht gekräuselter Filamente (Fasern) hergestellt. Die Lage der Filamente ist in den meisten Herstellungsarten wirr. Filament-Vliesstoffe werden in der Regel auf Großanlagen in großtechnischer Produktion mit vergleichsweise geringen Variationsmöglichkeiten gefertigt. Dabei lassen sich gewisse Ungleichmäßigkeiten in der Dicke (Wolkigkeiten) nicht bei allen Herstellungsverfahren vermeiden.

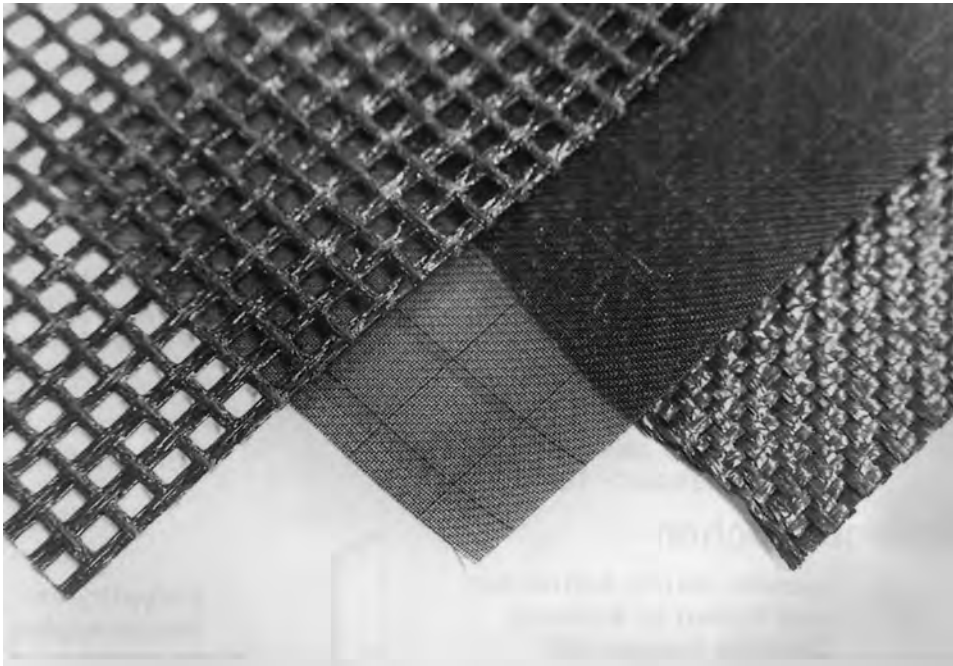


Abb. C 9: Detailaufnahme von Geweben

Nach der Ablage der Fasern (Spinnfasern oder Filamente) werden die Vliese mechanisch (Vernadeln), adhäsiv (Verkleben) oder kohäsiv (Verschmelzen) zu Vliesstoffen verfestigt (Abb. C 10). Bei einigen Produkten sind auch Mehrfachbindungen ausgeführt worden (z. B. mechanische und zusätzlich adhäsive oder kohäsive Bindung). Die Art der Verfestigung/Bindung kann die technischen Eigenschaften erheblich beeinflussen.

Sowohl Spinnfaser- als auch Filament-Vliesstoffe können mechanisch verfestigt werden (durch Reib- und Formschlussverbindung). Durch das Vernadeln von Vliesen, bei dem eine große Zahl spezieller Nadeln in das zu verfestigende Faserhaufwerk (Vlies) mit etwa 50 bis 500 Einstichen pro cm² eingestochen und wieder herausgezogen wird, ergibt sich durch Verschlingung die gewünschte Festigkeit. Die Nadeln, an deren Kanten als Haken wirkende Vertiefungen angebracht sind (sog. Feltingnadeln), sind in Form eines Nadelfeldes angeordnet. Durch die mechanische Verfestigung entstehen verschiebbliche Faserkreuzungspunkte. Mechanisch verfestigte Vliesstoffe sind in der Regel weich, flexibel und vergleichsweise dick (Dicke überwiegend > 1 mm, Porenanteil: etwa 90 %) (Abb. C 11).

Eine adhäsive Bindung kann unter Zusatz von Bindemitteln, die nach verschiedenen Verfahren auf das zu verfestigende Vlies aufgebracht und anschließend durch eine Wärmebehandlung ausgehärtet werden, erfolgen. Eine adhäsive Bindung ergibt an den Berührungstellen zweier oder mehrerer Fasern starre Verbindungen und dadurch eine geringere Flexibilität als bei einer mechanische Verfestigung.

Die dritte Möglichkeit ist die kohäsive Bindung, bei der die Vliese durch Erhitzung und oftmals unter Druck, aber ohne zusätzliche Bindemittel miteinander verbunden werden. Die Kern-/Mantelfasern haben eine beim Erhitzen klebrig werdende, niedriger als der Kern der einzelnen Faser schmelzende Hülle (Anschmelzen der Faserhülle). Beim Wiedererkalten ent-

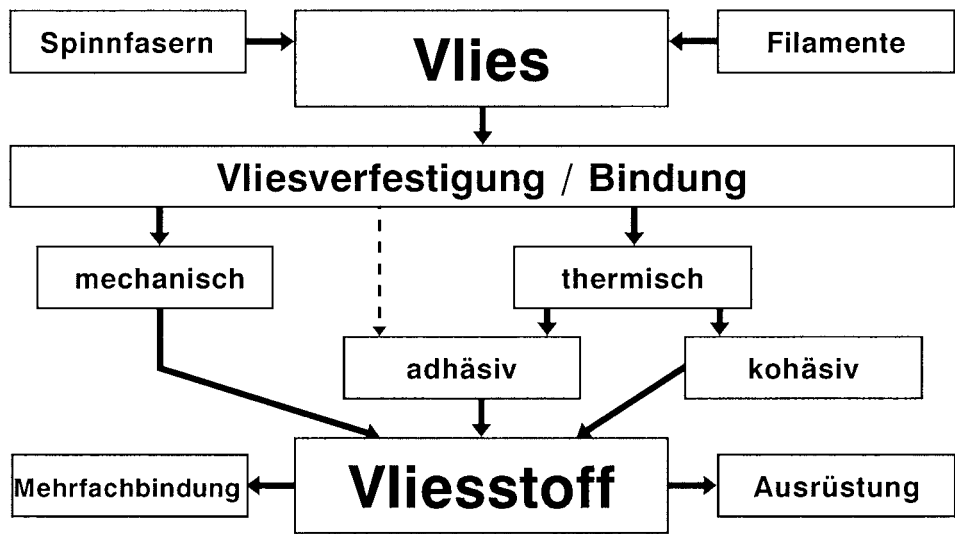


Abb. C 10: Verfestigung/Bindung von Vliesstoffen (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001)

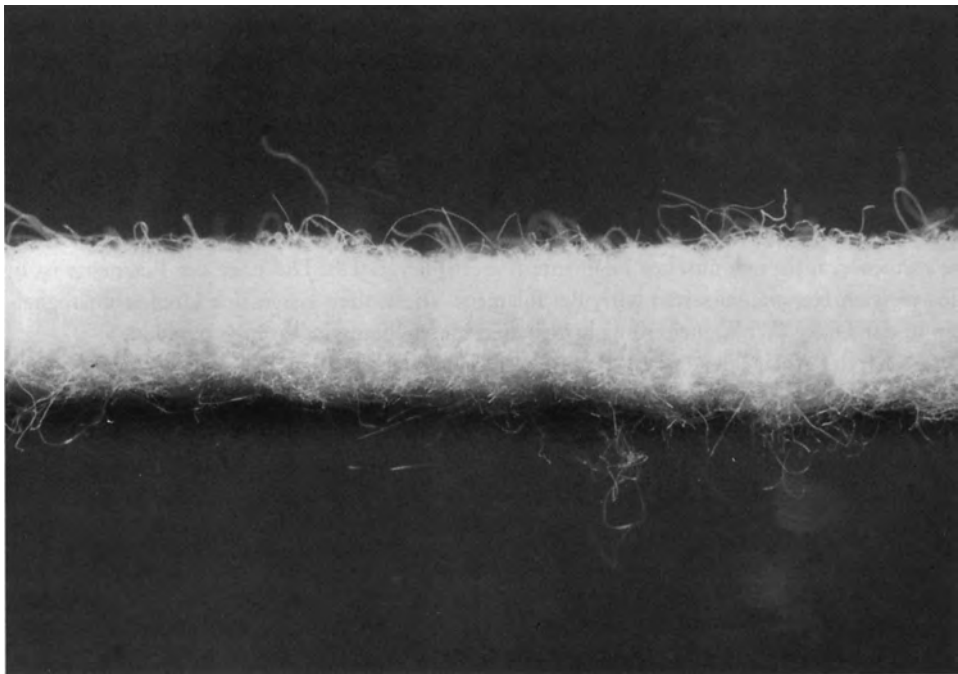


Abb. C 11: Detailaufnahme eines mechanisch verfestigten Vliesstoffes (Querschnitt)

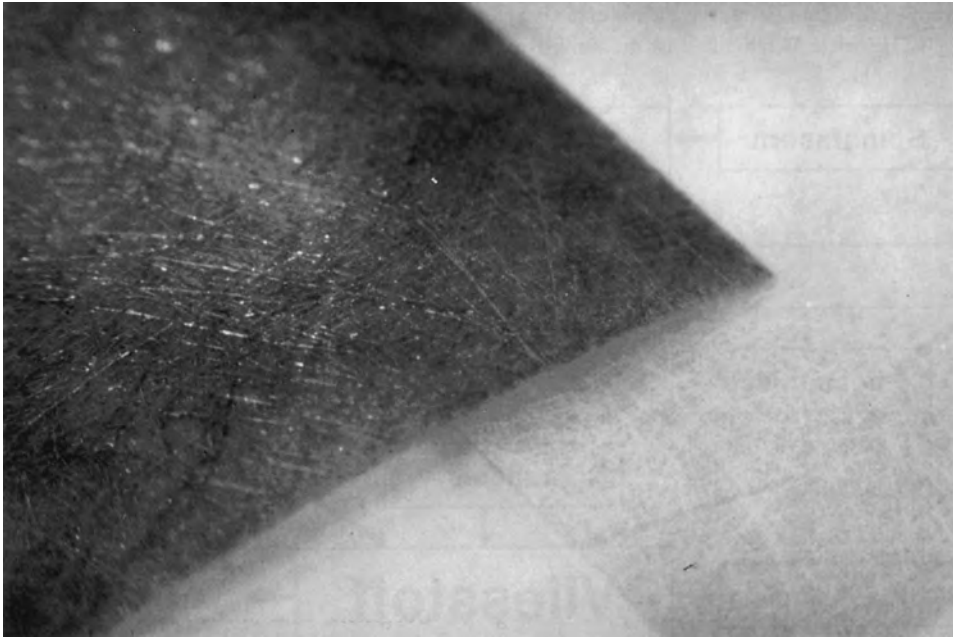


Abb. C 12: Detailaufnahme von thermisch verfestigten Vliesstoffen (Draufsicht)

stehen an den Faserkreuzungspunkten Bindungen, die im Vergleich zur adhäsiven Bindung weniger starr sind (Abb. C 12).

Entgegen der differenzierten technologischen Einteilung von Vliesstoffen nach der Norm EN ISO 10318 haben sich im allgemeinen Sprachgebrauch nur die Begriffe *mechanisch* und *thermisch* verfestigte Vliesstoffe durchgesetzt. Thermisch verfestigte Vliesstoffe waren einer thermischen Behandlung, zumeist unter gleichzeitiger Druckbeanspruchung, ausgesetzt; die Bindung der Vliese ist überwiegend kohäsiv, kann aber auch – im Gegensatz zur Definition in EN ISO 10318 – adhäsiv sein. Diese relativ dünnen (0,2 bis 1,5 mm) Vliesstoffe verkleben an den Kreuzungspunkten und sind durch den Verfestigungsvorgang stark komprimiert (Porenanteil: 60 % bis 70 %) und steif.

Vliesstoffe werden bevorzugt, wenn hohe Dehnbarkeiten gefordert werden. Bei Vliesstoffen sind die Festigkeiten durch die Wirrlage der Fasern im Vergleich zu Geweben richtungsunabhängig, obwohl Anisotropien bei einigen Herstellungsmethoden auftreten können. Durch die Wirrlage der Fasern tritt bei örtlicher Schädigung des Vliesstoffes ein Versagen eines Streifens wie bei einem Gewebe nicht auf. Insbesondere mechanisch verfestigte Vliesstoffe können sich einer unebenen Unterlage gut anpassen und bieten ein günstigeres Reibungsverhalten zu angrenzenden mineralischen Schichten als Gewebe. Bei örtlicher Beschädigung eines Vliesstoffes können die Fasern in beschränktem Umfang – in Abhängigkeit von ihrer Dehnung – Kräfte um die Bruchstelle herumleiten.

7.3.4 Verbundstoffe

Verbundstoffe sind mehrschichtige Geotextilien aus flächenhaft oder punktförmig verbundenen Schichten, die sich in ihrer Struktur voneinander unterscheiden. Die Einzelkomponenten können Gewebe und Vliesstoffe oder andere Flächengebilde mit Sonderkonstruktionen sein (EN ISO 10318). Sie sind ein zusammengesetztes Material, das mindestens aus einem Geotextil oder einem geotextilverwandten Produkt innerhalb der Komponenten besteht und das in geotechnischen und bautechnischen Bereichen verwendet wird (EN ISO 10318).

Die hier angesprochenen Verbundstoffe bestehen zum Beispiel aus einer Kombination von porenmäßig aufeinander abgestimmten Vliesstoffen mit unterschiedlicher Faserfeinheit oder aus einer Kombination von Gewebe bzw. Geogitter und Vliesstoff (Abb. C 13) oder aus verschiedenen Vliesstoffen und einer Stabilisierungsschicht (Rauigkeitsschicht). Abb. C 14 zeigt einen dreischichtigen Verbundstoff – Feinfilterschicht, Vorfilterschicht mit größerer Faserfeinheit und Stabilisierungsschicht – im Schnitt.

Spezielle Verbundstoffe, die aus einer Sickerschicht (z. B. Grobfaser- oder Wirrfaserschicht) und beidseitig aufgetragenen, z. B. mechanisch verfestigten Filter-Vliesstoffen bestehen, werden als geosynthetische Dränsysteme bezeichnet.

Verbundstoffe mit beidseitig angeordnetem Filter-Vliesstoff (Deck- und Trägervliesstoff) und dazwischen eingekapseltem Sand, sogenannte Sandmatten, können z. B. aufgrund des erhöhten Flächengewichts bei Einbau in größeren Wassertiefen und auch unter Strömungsbelastung ihre Anwendung finden (Abb. C 15).

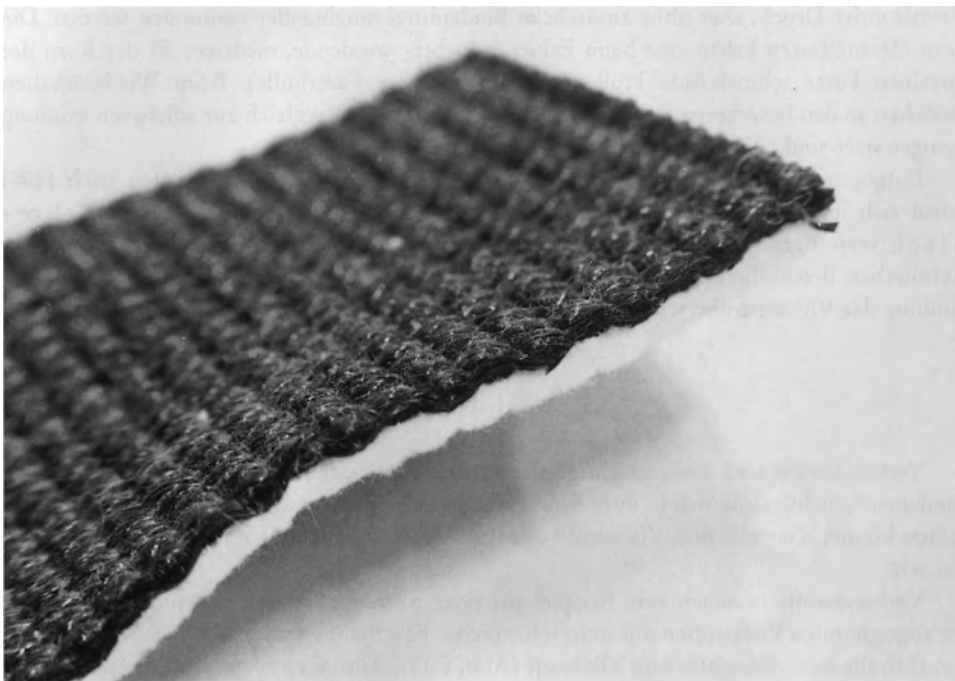


Abb. C 13: Detailaufnahme eines zweischichtigen Verbundstoffes aus Vliesstoff und Gewebe



Abb. C 14: Detailaufnahme eines Vliesstoffes mit Stabilisierungsschicht

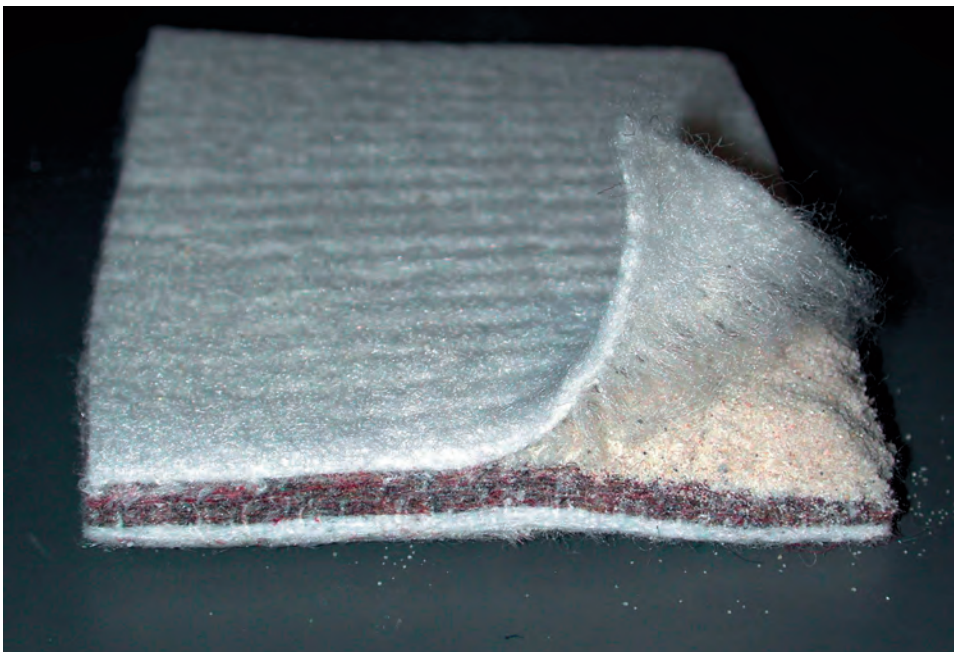


Abb. C 15: Detailaufnahme einer Sandmatte

Die Verbindung einzelner Schichten untereinander kann durch Vernadeln, Verschweißen, Vernähen oder Verkleben sowie durch Kombination dieser Verbindungsarten erfolgen.

Bei Verbundstoffen können die günstigen Eigenschaften einzelner Geotextilien kombiniert werden, d. h. sie sind dann zweckmäßig, wenn eine Verbesserung einer oder mehrerer Eigenschaften erreicht wird, bzw. Eigenschaften verschiedener Produkte gleichzeitig gefordert sind. Durch gezielt abgestufte Faserstrukturen können hochwirksame Filter- und Dränschichten geschaffen werden, die in ihren Wirksamkeiten herkömmlichen Kornfiltern oft überlegen sind.

7.4 Geotextilverwandte Produkte

Geotextilverwandte Produkte sind ebene, durchlässige polymere Konstruktionsmaterialien (synthetisch oder natürlich), die wie eine Bahn oder ein Streifen sein können und in geotechnischen und bautechnischen Bereichen verwendet werden und die nicht der Definition eines Geotextils entsprechen (EN ISO 10318).

Die geotextilverwandten Produkte werden in folgender Unterteilung betrachtet:

- Geogitter
- gitterähnliche Produkte
- Verbundstoffe (mit mindestens einer Einzelkomponente aus Geogitter oder gitterähnlichem Produkt).

Geogitter stellen eine polymere ebene Struktur aus einem regelmäßigen offenen Netzwerk aus vollständig verbundenen, zugbeständigen Elementen dar, die in geotechnischen und bautechnischen Bereichen verwendet werden (EN ISO 10318). Sie sind ein flächenhaftes Gitter aus einem regelmäßigen offenen Netzwerk, dessen Elemente durch Extrudieren, Verbinden und Verflechten miteinander verbunden sind und dessen Öffnungen größer als die Bestandteile sind. Als Rohstoffe werden die Polyolefine Polypropylen und Polyethylen (UV-stabilisiertes PEHD) eingesetzt. Die orientierten langkettigen Moleküle verleihen dem Geogitter eine hohe Zugfestigkeit. Zweiaxial gereckte Gitter (mit Längs- und Querrippen sowie Kreuzungspunkten) werden hergestellt, indem einaxial gereckte Gitter nochmals rechtwinklig zur einaxialen Orientierung gereckt werden (Abb. C 16). Jede Querrippe wirkt hier als Anker und garantiert eine hohe Zugfestigkeit. Geogitter können eingeteilt werden in

- gewebte Geogitter
- gestreckte Geogitter
- gelegte Geogitter.

Gewebte Geogitter sind Gewebe mit Öffnungen über 10 mm (WILMERS, 1994).

Gestreckte Geogitter werden aus Kunststoffdichtungsbahnen hergestellt. Die Bahnen werden gelocht und in eine oder beide Richtungen (längs und quer) gestreckt. Die Knotenpunkte sind unverschieblich, wodurch eine Kraftübertragung zwischen Längs- und Querstreben gegeben ist (WILMERS, 1994).

Gelegte Geogitter werden aus Bändern, Stäben oder stabförmigen Elementen hergestellt. Dafür werden diese kreuzweise gelegt und an den Kreuzungspunkten flexibel (z. B. durch Ummantelung) oder unverschieblich (z. B. durch Reibschweißen oder Lasertechnik) miteinander verbunden.

Geogitter werden hauptsächlich als Bewehrungsschichten zur Erhöhung der Anfangsfestigkeit von Dammauflagern und zum Bau steiler Böschungen und Stützkonstruktionen, aber auch als Trennschichten für Untergrundstabilisierungen eingesetzt.

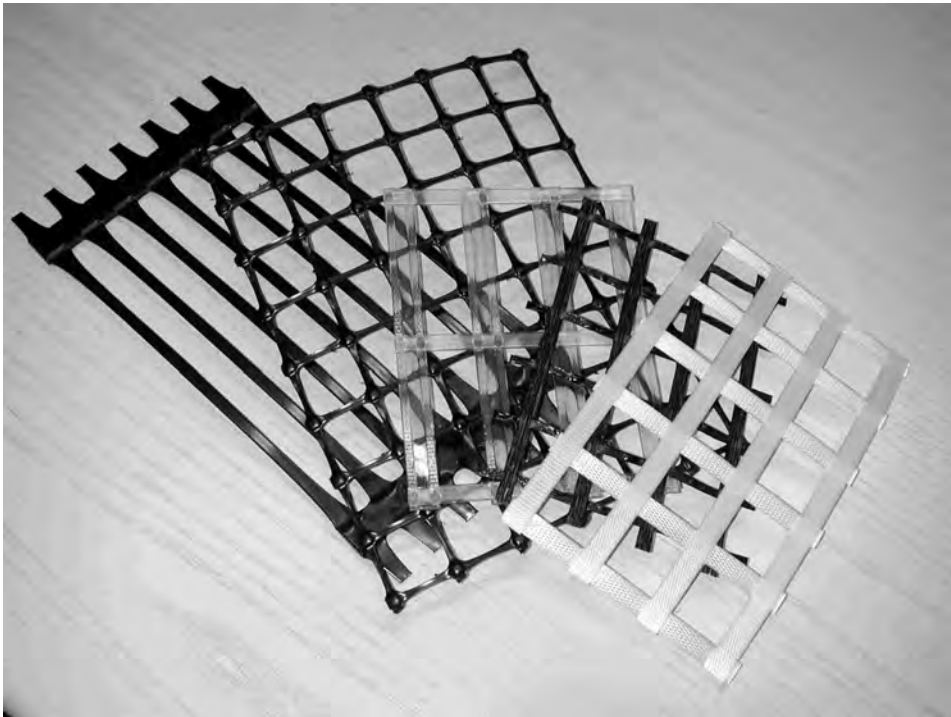


Abb. C 16: Verschiedene Geogitter

Aufgrund der in beiden Richtungen vorhandenen Zugfestigkeit werden beispielsweise Geogitter mit steifen Kreuzungspunkten (insbesondere zweiachial orientierte) als Bewehrungen von Tragschichten bei weichen, wenig tragfähigen Böden, z. B. unter Dammschüttungen, verwendet. Hinweise zur erdstatischen Berechnung von Erdbauwerken mit bewehrten Geokunststoffen können WILMERS (1994) und EB GEO (1997) entnommen werden.

Bewehrungen werden überwiegend mit gewebten, gestreckten und gelegten Geogitter mit relativ geringer Dehnung und Kriechneigung berechnet ausgeführt. Der Geokunststoff muss die erforderlichen Zugkräfte bei bauwerksverträglicher Dehnung langfristig aufnehmen.

Neben den in Scherversuchen bestimmten Reibungsbeiwerten spielen bei der Dimensionierung von Geogittern Herausziehversuche (Verzahnungskräfte zwischen Gitter und umgebendem Boden), Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und besonders das Kriechverhalten eine große Rolle. Weitere Randbedingungen werden in WILMERS (1994) und EB GEO (1997) genannt.

7.5 Dichtungsbahnen

Dichtungsbahnen sind industriell hergestellte ein- oder mehrlagige (synthetische, polymere oder bituminöse) Bahnen als wasserundurchlässige Elemente, die in geotechnischen und bautechnischen Bereichen verwendet werden. Dichtungsbahnen können eingeteilt werden in:

- homogene Dichtungsbahnen
- heterogene Dichtungsbahnen.

Homogene Dichtungsbahnen sind industriell hergestellte Dichtungsbahnen aus *einem* Werkstoff (Thermoplaste/Elastomere) oder aus Mischpolymerisaten (z. B. aus Mischung von Polyethylen PE und Bitumen) und können eingeteilt werden in:

- Folien (Dicke < 1 mm)
- homogene Kunststoffdichtungsbahnen (Hochpolymerbahnen mit Dicke ≥ 1 mm).

Homogene Dichtungsbahnen bestehen aus

- Thermoplasten (es wird unterschieden zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten) und
- Elastomeren

oder aus Mischpolymerisaten (z. B. Mischung aus Polyethylen PE und Bitumen) mit einer Mindestdicke von 1,0 mm.

Bei den amorphen Thermoplasten ist die Lage der Makromoleküle völlig ungeordnet. Die mechanischen Eigenschaften sind in hohem Maße temperaturabhängig. Der *plastische* Verformungsanteil ist hoch. Dagegen weist die Struktur der teilkristallinen Thermoplaste amorphe und auch kristalline Bereiche auf. In den kristallinen Bereichen liegen die Makromoleküle geordnet zueinander. Bei den Elastomeren ist die Lage der Makromoleküle zueinander wie bei den amorphen Thermoplasten statistisch verteilt. Allerdings sind sie in Teilbereichen miteinander räumlich vernetzt (Abb. C 17). Der *elastische* Verformungsanteil ist hier hoch; der *plastische* Anteil entsprechend gering.

Heterogene Dichtungsbahnen sind industriell hergestellte Dichtungsbahnen, die ein- oder beidseitig mit Vliesstoffen oder Folien kaschiert oder mit Trägereinlagen aus Geweben oder Vliesstoffen versehen sind oder die aus mehreren Schichten bestehen. Sie gelten als Verbundsystem und werden eingeteilt in:

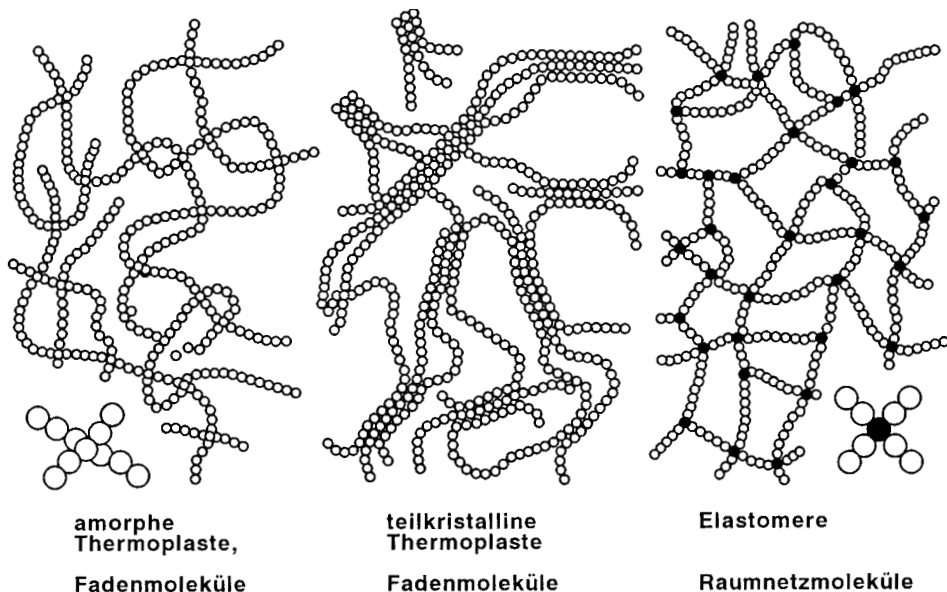


Abb. C 17: Struktur der Kunststoffe (DVWK-Merkblatt, 1992)

- Dichtungsbahnen mit Trägereinlagen oder AKW/CKW-Sperrbahnen
- Dichtungsbahnen mit verbundenen Schutzschichten
- Bitumenbahnen mit Kunststoffeinlagen in einer Mindestdicke von 5,0 mm.

Die Oberflächen der Dichtungsbahnen können glatt, durch Prägung, Noppen oder Riffelung profiliert und sandrau strukturiert werden. Einfärbungen geben Hinweise auf bestimmte Eigenschaften (DIN 16937), mit Ruß kann die Wetterbeständigkeit erhöht werden. Durch die Auswahl und Zusammensetzung der Werkstoffe, aber auch durch die Herstellungsverfahren selbst können die Kunststoffdichtungsbahnen auf sehr unterschiedliche Anwendungen abgestimmt werden. An die dichten und festen Verbindungen sind grundsätzlich die gleichen Anforderungen zu stellen wie an die Dichtungsbahnen selbst (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001; DVWK, 1992). Je nach Dichtungswerkstoff werden die üblichen Fügetechniken Schweißen (Warmgas-, Heizelement- und Extrusionsschweißen), Kleben (Diffusions-, Adhäsions- und Heißkleben) und sonstige Verfahren (Vulkanisieren und Flämmschweißen) verwendet (SAATHOFF u. ZITSCHER, 2001).

7.6 Dichtungsbahnen verwandte Produkte

Dichtungsbahnen verwandte Produkte sind industriell oder vor Ort hergestellte ein- oder mehrlagige Bahnen als nahezu wasserundurchlässige Elemente ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s), die in geotechnischen und bautechnischen Bereichen verwendet werden.

Im Bereich der Dichtungsbahnen verwandten Produkte ist noch nicht klar definiert, welche Produkte außer der geosynthetischen Tondichtungsbahn in diese Kategorie einzusortieren sind. Möglicherweise werden zukünftig beschichtete Geotextilien, beschichtete Bentonitmatten oder Verbundstoffe aus Folien bzw. Dichtungsbahnen und Bentonit bzw. Ton eigenständige Rubriken beanspruchen.

7.6.1 Geosynthetische Tondichtungsbahnen

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD), allgemein bekannt unter dem Namen Bentonitmatten, sind industriell gefertigte Verbundprodukte aus polymeren und mineralischen Komponenten, die als flächige Dichtungselemente in Bereichen der Geotechnik und des Wasserbaus eingesetzt werden. Die Herstellung dieses Verbundproduktes erfolgt aus Geokunststoffen und Ton, typischerweise Bentonit, der die Funktion einer hydraulischen Barriere übernimmt.

Geosynthetische Tondichtungsbahnen fixieren durch ihre Träger- und Deckgeotextilien in ihrem Inneren das tonige Dichtungsmaterial. Der in geosynthetischen Tondichtungsbahnen verwendete, getrocknete, pulverisierte bzw. granulierte Bentonit ist ein Ton, der überwiegend (ca. 70–90 Masse-%) aus dem Tonmaterial Montmorillonit der Smectit-Gruppe besteht. Derzeit werden überwiegend natürliche Natrium-Bentonite, natriumaktivierte Calcium-Bentonite und Calcium-Bentonite in geosynthetischen Tondichtungsbahnen eingesetzt. Der Verbund wird durch Vernadelung oder Vernähung der Deck- und Trägergeotextilien erreicht. Geosynthetische Tondichtungsbahnen eignen sich für den Unterwassereinebau, da die Fügetechnik auf Überlappungen basiert. Empfehlungen zur Anwendung sind in EAG-GTD (2002) formuliert.



Abb. C 18: Verschiedene geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten)

7.7 Zusammenfassung

Die Entwicklung der Anwendung von Geokunststoffen in der Geotechnik und im Wasserbau verläuft äußerst rasant. Der Ursprung mit ersten Anwendungen von Geokunststoffen im Bauwesen liegt bereits 45 Jahre zurück und ist im Anwendungsfeld des Küstenwasserbaus begründet. In diesem Entwicklungszeitraum wurden in der Technologie der Kunststoffe und im praktischen Einsatz umfangreiche Erfahrungen über das Verhalten der verschiedenen Produkte im Boden bei unterschiedlichsten Beanspruchungen und Randbedingungen gesammelt und Empfehlungen zur Anwendung formuliert. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Entwicklung an einem Punkt angekommen, an dem ingenieurtechnologische Anwendungen in der Geotechnik und im Wasserbau ohne Geokunststoffe unvorstellbar sind. Mit der Weiterentwicklung der Geokunststoff-Technologie erweitert sich das Feld der Anwendungsgebiete im Bauwesen.

Für die in den vorliegenden Empfehlungen beschriebenen Anwendungsbeispiele mit Geokunststoffen im Küstenwasserbau sind das Verhalten und die Wirkungsweise der verschiedenen Produkte genau zu ergründen. Für die Lebensdauer und Sicherheit der Konstruktion sind in den meisten Fällen die Auswahl eines geeigneten Geokunststoffes, der kontrollierte Einbau und das Langzeitverhalten von entscheidender Bedeutung.

8. Holz

8.1 Allgemeines

Für Bauwerke des Küstenschutzes werden europäische und überseeische Holzarten sowohl als Rundholz als auch in Form von Schnittholz verwendet. Der Baustoff Holz kann gegenüber anderen Baustoffen wie Stahl und Beton durch seine leichte Bearbeitbarkeit Vorteile haben. Holz hat gute Festigkeitseigenschaften im Verhältnis zu seinem Gewicht, es unterliegt jedoch als organischer Baustoff der Fäulnis und den Angriffen von Holzschädlingen und bedarf ggf. eines besonderen Schutzes. Tropische Hölzer haben einen hohen Abnutzungswiderstand und eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse. Zur Schonung des tropischen Regenwaldes sollten jedoch – wo immer möglich – nur Plantagenholz, andere verfügbare Hölzer oder andere Baustoffe eingesetzt werden.

Von seiner Struktur her ist Holz ein anisotroper Baustoff mit den Hauptbestandteilen Zellulose, Hemicellulose und Lignin. Ein hoher Ligningehalt bewirkt im Allgemeinen eine höhere Festigkeit. Zu den Nebenbestandteilen rechnen Pektine, Stärke, Fette und Eiweiß, Farb- und Gerbstoffe, Harze, ätherische Öle, Mineralstoffe und Andere. Sie bestimmen die Farbe, den Geruch, die Resistenz des Kernholzes gegen Schädlinge (s. 8.4 Dauerhaftigkeit) und das chemische Verhalten.

8.2 Physikalische Eigenschaften

In Tab. C 20 sind Rohdichte, Festigkeit, Elastizitätsmodul und Härte einiger Holzarten angegeben. Da Holz ein poriger, hygroskopischer Stoff ist, verändert sich die Rohdichte mit dem Feuchtigkeitsgehalt. Als Basis für wissenschaftliche und technische Zwecke werden die Rohdichten bei 0 %, 12 % und 15 % Feuchtigkeitsgehalt bevorzugt. Die Dichte des Holzes ist für alle Holzarten gleich und beträgt $15,6 \text{ kN/m}^3$. Alle Angaben in Tab. C 20 gelten für den normalklimatisierten Zustand ($20^\circ\text{C}/65\%$) des Holzes, d. h. für einen Holzfeuchtegehalt von etwa 12 %. Mit ansteigender Feuchte nimmt die Rohdichte zu, während die Festigkeiten abnehmen (s. 8.3 Zulässige Spannungen). Die Rohdichte ist eine wichtige Kenngröße, weil mit steigender Rohdichte tendenziell die Festigkeiten, der Verschleißwiderstand und die Härte zunehmen. Auch die Quell- und Schwindmaße liegen bei dichteren Holzarten meist höher als bei weniger dichten.

In den Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ (EAU, 1990) werden Kennwerte überseeischer Harthölzer genannt, die aufgrund amerikanischer, englischer, französischer und niederländischer Forschungsergebnisse zusammengestellt worden sind. Diese Kennwerte sind nach anderen Kriterien ermittelt und aufgelistet, so dass eine Abstimmung mit den in Tab. C 20 genannten Daten nicht möglich ist. Da die in den EAU genannten Kennwerte zusätzliche wertvolle Informationen liefern, sind sie in Tab. C 21 wiedergegeben.

8.3 Zulässige Spannungen

Für Bauholz sind die zulässigen Spannungen, Elastizitäts- und Schubmoduln in DIN 1052 angegeben.

Bei Bauteilen, die der Feuchtigkeit und Nässe ungeschützt ausgesetzt sind, müssen die Werte für die zulässigen Spannungen nach DIN 1052 auf $\frac{2}{3}$ ermäßigt werden. Eine Redu-

zierung der Werte auf $\frac{2}{3}$ muss auch vorgenommen werden für Bauteile, die dauernd im Wasser stehen, selbst wenn diese Hölzer imprägniert wurden. Falls die erstgenannten Bauteile jedoch mit einem geprüften Mittel (DIN 68800) geschützt worden sind, genügt eine Abminderung der in den Tabellen der DIN 1052 angegebenen zulässigen Spannungen auf $\frac{5}{6}$. Für Hölzer in Bauteilen, die der Witterung allseitig ausgesetzt sind oder bei denen mit einer dauernden Durchfeuchtung zu rechnen ist, schreibt die DIN 1052 auch eine Abminderung der Elastizitäts- und Schubmoduln auf $\frac{5}{6}$ der Werte vor.

Im Normentwurf der DIN 1052 (05-2000) erfasst der Modifikationsbeiwert K_{mod} über Nutzungsklassen und Lasteinwirkungsdauer den Abminderungsfaktor.

Sortierklassen und Holzarten mit ähnlichen Festigkeitseigenschaften werden in der DIN EN 338 zu Festigkeitsklassen zusammengefasst, innerhalb derer die Austauschbarkeit sichergestellt ist.

8.4 Dauerhaftigkeit

Wasserbauhölzer sind mechanischen Angriffen und Verschleiß (anlegende Schiffe, Sandschliff) sowie der Zerstörung durch pflanzliche Fäulnis und tierische Schädlinge ausgesetzt.

Die Fäulnis des Holzes wird durch Pilze bei feuchtem Holz hervorgerufen. Trockenes Holz (Feuchte unter 20 %) und wassergesättigtes Holz werden nicht befallen. Gefährdet ist deshalb Holz in der Wasserwechselzone. Als tierische Schädlinge treten im Wasserbau vor allem Bohrmuscheln und Bohrasseln auf, die jedoch auf einen Mindestsalzgehalt von 7 ‰ angewiesen sind. Keine Holzart ist völlig immun gegen Pilze, Insekten und Meerestiere, der Grad der Dauerhaftigkeit wird auf den Gehalt an Resistenzstoffen zurückgeführt. Eine Übersicht über die Haltbarkeit von Kernholz gibt Tab. C 22 wieder. Splintholz ist allgemein nur wenig bzw. nicht dauerhaft.

8.5 Schutzmaßnahmen

Schutz gegen Abrieb kann in gewissen Grenzen durch die Anbringung von Suhlplatten, Kunststoffprofilen, zusätzlichen Reibehölzern, Vermeiden ständiger Reibung in der Konstruktion, durch Zwischenschaltung von Stahl und durch Überdimensionierung mit entsprechender Reserve gewährleistet werden.

Als wirksamer Schutz europäischer Hölzer gegen Fäulnis und tierische Schädlinge wird eine Imprägnierung, ggf. als Druckimprägnierung, mit einem dafür zugelassenen Holzschutzmittel unter Beachtung der Teerölverordnung angewandt.

Hierdurch kann die Lebensdauer wesentlich erhöht werden. Ungeschützte europäische Holzarten sollten nur eingebaut werden, wenn sie sich ständig unter Wasser befinden oder wenn mit einer Gebrauchsdauer von weniger als 10 Jahren gerechnet wird. Bei tropischen Holzarten können Standzeiten bis 50 Jahre, in der Wasserwechselzone im Mittel 20 bis 30 Jahre erreicht werden (s. Tabellen C 21 und C 22).

Tab. C 20: Holzarten und ihre Materialkennwerte⁴ (DIN 68364, SCHÖNBECK, 1976)

Holzart ¹	Roh- dichte g/cm ³	Druck- festig- keit β_D^5 N/mm ²	Biege- festig- keit β_D N/mm ²	Scher- festig- keit τ_a^5 N/mm ²	Long. Elastizitäts- modul E N/mm ²	Härte nach Janka N/mm ²	Zug- festig- keit β_z N/mm ²
Kiefer	0,52	45	80	10	11 000	30–36 25–31 H ² S ²	100
Fichte	0,47	40	68	7,5	10 000	27 16 H S	80
Tanne	0,47	40	68	7,5	10 000	34 18 H S	80
Douglasie	0,54	50	80	9,5	12 000	30 24 H S	100
Pitch-Pine	0,70	53	94	10	12 900	42 38 H S	³
Eiche	0,67	52	95	8,5	13 000	48–69 26–45 H S	110
Rüster	0,68	43	91	9	10 600	54 39 H S	³
Buche	0,69	60	120	10	14 000	72 60 H S	135
Jarrah	1,00	57	103	13	13 400	122 110 H S	³
Greenheart (Demerara)	1,00	100	180	14	22 000	³ 122 S	220
Azobè (Ekki Bongossi)	1,06	95	180	14	17 000	217 140–180 H S	180
Bilinga (Badi, Opepe)	0,76	64	105	9	12 500	82 62 H S	110
Angèlique (Basralocus)	0,76	70	120	12	14 000	93–105 49–55 H S	³
Manbarklak (Kakoralli)	1,10	72	160	13	20 000	130 123 H S	³
Keruing (Yang)	0,76	70	125	12	16 000	70 70 H S	140
Afzelia (Apa Doussie)	0,79	70	115	12,5	13 500	³	120
Karri	0,95	66	129	13	19 200	84 73 H S	³

1 Bezeichnungen nach DIN 4076. Gebräuchliche andere Bezeichnungen sind in Klammern angegeben.

2 H – auf der Hirnfläche; S – auf der Seitenfläche des Holzes.

3 In der Literatur nicht aufgeführt.

4 Alle Angaben beziehen sich auf einen Feuchtigkeitsgehalt von rd. 12 %; Mittelwerte.

5 Die Druck- und Scherfestigkeiten wurden bei Belastung in Faserrichtung ermittelt.

Tab. C 21: Kennwerte wichtiger tropischer Harthölzer nach EAU 1990

Name der Holzarten	Wissen-schaftlicher Name	Mitrl. Wichte kN/m ³	Feuchtig-keit	Abs. Druck-festigk. MN/m ²	E-Modul festigk. MN/m ²	Abs. Biege-keit MN/m ²	Scher-festigkeit Jahre MN/m ²	Gebrauchs-dauer* A B	Teredo-beständigkeit
Demerara Greenheart	Ocotea rodiaci	10,5	trocken nass	92 72	21 500 20 000	185 107	21 12	> 25 50	Ja, aber etwas weniger als Basalocus
Opepe (Beinga)	Saroe-phalus	7,5	trocken nass	63 50	13 400 12 900	103 92	14 12	> 25 50	
Azobe (Ekki Bongossi)	Lophira procera	10,5	trocken nass	94 60	19 000 15 000	178 119	21 11	> 25 50	Ja, aber begrenzt
Manbarklak (Kakoralli)	Eschweilera longipes	11,0	trocken nass	72 52	20 000 18 900	160 120	13 11	15 ... 25 40 ... 50	Ja
Basalocus Angelique	Dicorynia paraensts	8,0	trocken nass	62 39	15 500 12 900	122 80	11,5 7	> 25 50	Ja
Jarrah	Eucalyptus marginata	10,0	trocken nass	57 35	13 400 9 900	103 66	13 9	15 ... 25 40 ... 50	Ja, aber begrenzt
Yang	Dipterocarpus Afzelta	8,5	trocken nass	54 39	14 600 12 300	109 80	11 10	10 ... 15 25 ... 40	Nein
Afzelia	Afzelia	7,5	trocken	66	13 000	106	13	15 ... 25 40 ... 40	Nein

* Unter Gebrauchsdauer ist die Dauerhaftigkeit in Jahren angegeben ohne irgendwelche Pflege oder Imprägnierung. Und zwar für: A in fortwährendem Kontakt mit feuchtem Boden (Humus, Luft-, Wasserwechselzone), B nur der Witterung ausgesetzt.
Die Aussagen über die Dauerhaftigkeit tropischer Hölzer gelten vor allem für gemäßigste Klimazonen.

Tab. C 22: Haltbarkeit gebräuchlicher Holzarten

Holzart	Härte Elastizität	Bearbeitbarkeit	Haltbarkeit von Kernholz
a) Europäische Hölzer			
Eiche	hart, zäh, sehr elastisch	gut, beim Rammen Spaltgefahr bei kleinerem Querschnitt	in der Wasserwechselzone 15 bis 20 Jahre
Ulme	mittelhart, elastisch	schwer spaltbar	in der Wasserwechselzone 10 bis 15 Jahre
Erle	weich, wenig elastisch	gut	in der Wasserwechselzone nicht dauerhaft
Buche	hart, ziemlich elastisch	gut	in der Wasserwechselzone nicht dauerhaft
Kiefer	weich bis sehr weich, elastisch	gut	in der Wasserwechselzone 6 bis 7 Jahre
Lärche	ziemlich weich, zäh, elastisch	gut	in der Wasserwechselzone 6 bis 7 Jahre
Fichte Tanne	sehr weich elastisch	gut	in der Wasserwechselzone sehr geringe Lebensdauer
b) Überseeische Harthölzer			
Angélique (Basralocus)	hart und fest, mäßig spröde	in frischem Zustand gut bearbeitbar, jedoch schwer zu nageln und zu schrauben, beim Rammen Maßnahmen gegen Splintern erforderlich, neigt besonders bei Frost zum Spalten	in der Wasserwechselzone 20 bis 30 Jahre, bohrmuschelbeständig
Greenhart (Demerara)	hart und sehr fest, wenig spröde	ziemlich gut bearbeitbar, schwer zu nageln und zu schrauben, leicht spaltbar	in der Wasserwechselzone 20 bis 30 Jahre, bohrmuschelbeständig
Manbarlak	sehr hart und fest, zäh, geradfaserig, wenig spröde	Neigung zum Spalten, schwierig zu bearbeiten, Verwendung als 4kantig behauene Pfähle	in der Wasserwechselzone 20 bis 30 Jahre, bohrmuschelbeständig
Azobe (Bongossi)	hart und sehr fest	schwer bearbeitbar, großer Spalt- widerstand, als Schnittholz besonders geeignet, wird bei Nässe sehr glatt	In der Wasserwechselzone 20 bis 30 Jahre, ziemlich bohrmuschel- beständig
Jarrah	hart, fest, sehr zäh	gut bearbeitbar, schwer zu nageln	in der Wasserwechselzone 20 bis 30 Jahre, aber wenig bohrmuschel- beständig
Goupie	hart	gut bearbeitbar	mäßig bohrmuschelbeständig
Afzelia (Doussie, Apa)	ziemlich hart, mäßig spröde	gut bearbeitbar formbeständig, neigt zum Spalten	in der Wasserwechselzone 20 bis 25 Jahre, nicht bohrmuschelbeständig

9. Stahl

9.1 Allgemeines

Stahl findet bei Bauwerken des Küstenschutzes hauptsächlich in Form von Walzprofilen für Spundwände und Pfähle sowie als Drahtgeflecht Verwendung.

Spundwände dienen als Stützwände zur Sicherung von Geländesprüngen und Steilufern, zum Bau von Bühnen, Fangedämmen und Molen, als Fußsicherung von Deckwerken, zur Erhöhung von Deichen in beengten Lagen und als Baugrubenumschließungen. Grundsätze und Einzelheiten zur statischen Berechnung, zur Konstruktion sowie zur Herstellung sind in EAU (1990) und im Grundbautaschenbuch von 1982 ausführlich beschrieben.

In Sonderfällen können Spundwände als gelochte Wände zur Verminderung von Strömungsgeschwindigkeiten und zur Umwandlung von Wellenenergie eingesetzt werden.

Dalben nehmen die Anfahrerenergie von Schiffen auf, dienen auch zur Aufnahme des Trossenzuges und können als Abweiser für zu schützende Bauwerke eingesetzt werden.

Stahlpfähle werden vorwiegend bei Pfahlgründungen als Zug- und Druckglieder und bei Spundwänden als Anker verwendet (Grundbautaschenbuch, 1982).

Draht wird zu Drahtgeflechten und Drahtnetzen verarbeitet, die für Steinmatten, Drahtschotterkästen, Drahtsenkwalzen und Ähnlichem benötigt werden.

9.2 Anforderungen und Eigenschaften

Die Stahlsorten der Spundwandstähle müssen den „Technischen Lieferbedingungen für Stahlspundbohlen“ entsprechen. Spundwandstahl St Sp 37 ist wegen seiner hohen Dehnung, guten Formänderungsfähigkeit und Schweißbarkeit für alle Verwendungszwecke geeignet. Spundwandsonderstähle St Sp S finden dort Anwendung, wo neben den genannten Eigenschaften höhere Festigkeiten zu einer wirtschaftlichen Bemessung führen können. Neben einer wirtschaftlichen Bemessung ist die Rammbarkeit des anstehenden Untergrundes ein wesentliches Kriterium für die Wahl der Stahlsorte und des Profils.

In Sonderfällen, z. B. bei schwierigen Schweißarbeiten, räumlichen Spannungszuständen und bei dynamischen Wechselbeanspruchungen gem. EAU-Empfehlung E 20 sind beruhigte Stähle nach DIN 17 100 wie R St 37-2, St 37-3 oder St 52-3 zu verwenden. Im Wasserbau eingesetzte Stähle sollten das Streckgrenzenverhältnis (= Streckgrenze zu Bruchfestigkeit) von 0,75 nicht überschreiten. Wird dieses Streckgrenzenverhältnis wesentlich überschritten, so ist bei hochfesten Stählen die Spannungsrisskorrosion zu beachten (DIN 18800, Teil 1).

Spundwandprofile zeichnen sich durch harte, glatte Oberflächen mit hohen Festigkeiten aus.

Die Lebensdauer des Stahles hängt von der chemischen Zusammensetzung des Seewassers, der Beanspruchung und den getroffenen Schutzmaßnahmen ab.

9.3 Stahlspundwände

Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass die Nutzungsdauer von Stahlspundwänden erheblich durch Korrosion beeinflusst werden kann. Der Korrosionsverlauf kann in guter Annäherung als logarithmische Funktion der Zeit dargestellt werden (BINDER, 2001).

Hohe Abtragsgeschwindigkeiten treten bei ungestörter Korrosion in der Anfangsphase auf. Mit zunehmender Dicke der Rostschicht wird die Korrosion gehemmt, so dass die Abtragsgeschwindigkeiten mit zunehmendem Alter abnehmen.

So bilden sich über die Höhe der Spundwand Bereiche mit unterschiedlich starker Korrosion aus (HEIN, LADEBURG, MENNENÖH u. SCHRÖDER, 1975). Wie Abb. C 19 zeigt, liegt die Hauptkorrosionszone

- im Tidegebiet (z. B. Nordsee) im Bereich zwischen der MTnw-Linie und bis zu 2,5 m darunter sowie
- in den übrigen Gewässern (z. B. Ostsee und Binnenbereich) zwischen der MW-Linie und bis zu 2 m darunter.

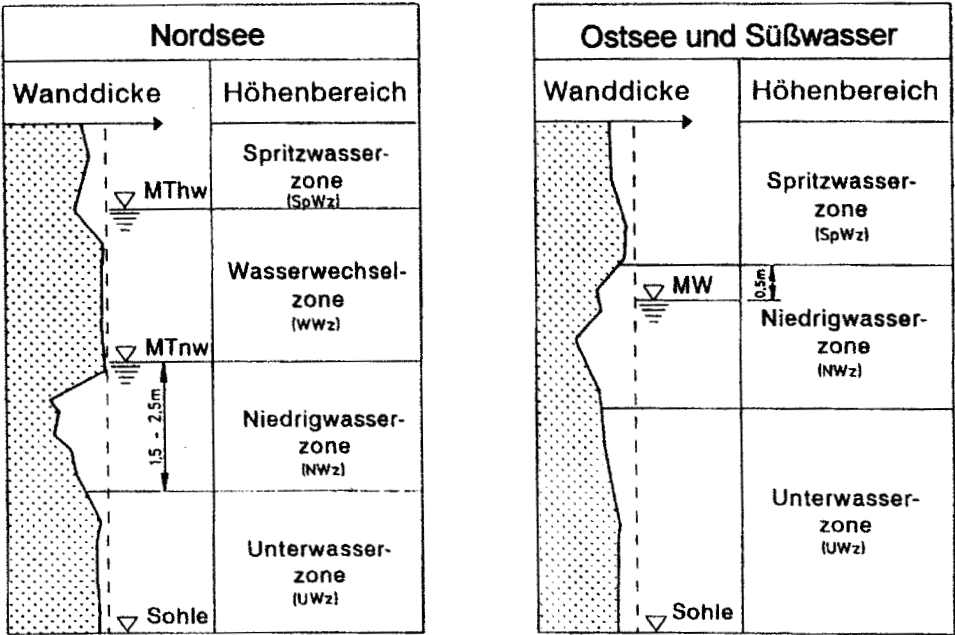


Abb. C 19: Korrosionszonen an Spundwandbauwerken, statistische Datenauswertung von Wanddickenmessungen an korrodierten Spundwänden (ALBERTS u. HEELING, 1997)

Mittlere bzw. maximale Abtragsgeschwindigkeiten in Süßwasser bzw. Meerwasser zeigt Abb. C 20.

Bei Bauwerken, die hohen und häufigen Wellenbelastungen ausgesetzt sind (z. B. Hafentmolen), muss außerdem in der Spritzwasserzone mit einem zweiten, oft jedoch nicht so ausgeprägten Korrosionsmaximum gerechnet werden.

Die Korrosion ist von zahlreichen, oft gleichzeitig auftretenden Einflussfaktoren abhängig, so dass sich nicht nur für verschiedene Standorte, sondern auch für jedes Bauwerk unterschiedliche jährliche Abtragsgeschwindigkeiten ergeben (ALBERTS et al., 1986):

- Neben den Einflüssen aus der Lage und Geometrie der Uferwand (Hauptwind- und Wellenrichtungen, Wasserstände, Eintauchtiefe, Höhe der Spritzwasserzone) wirken erhöhte Wassertemperaturen und aggressive Wässer (z. B. Brack- und Seewasser) korrosionsfördernd.

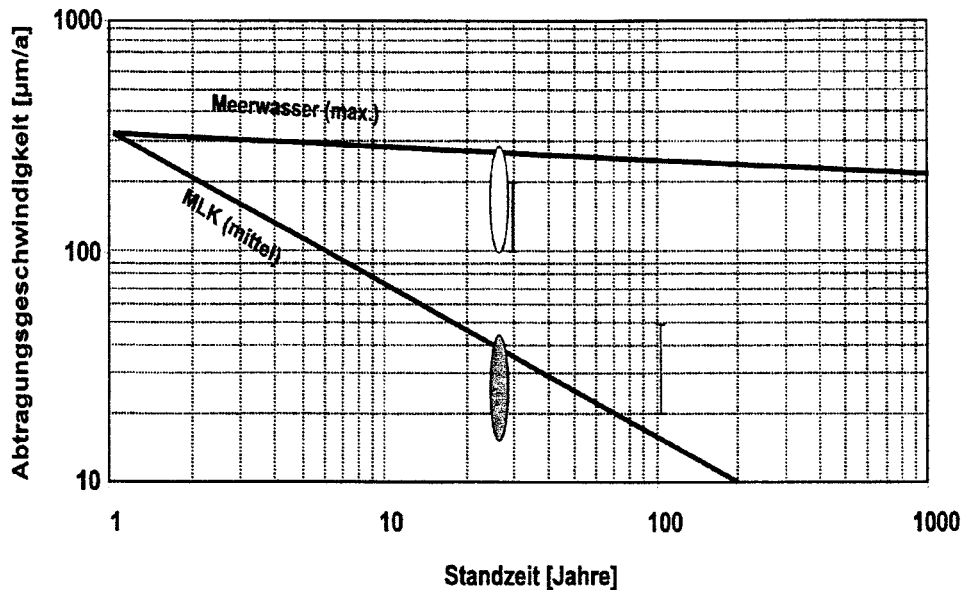


Abb. C 20: Mittlere bzw. maximale Abtragsgeschwindigkeiten im Mittellandkanal (MLK) und Meerwasser nach (BINDER, 2001)

Schwarzes Feld: Aktuelle Messungen „Unterwasserzone“;
 Eingetragtes Feld: Aktuelle Messungen „Spritzwasserzone“;
 Balken: Berechnung nach DIN 50929

- Besonders hohe Abtragsgeschwindigkeiten sind zu erwarten, wenn die Rostschicht durch mechanische Beanspruchungen immer wieder abgetragen wird. Dieses ist häufig dann der Fall, wenn Reibehölzer fehlen und Schiffe mit ihren Fendern direkt an der Spundwand scheuern. Auch können Seegang, Sandschliff und Eisgang die Ursache für einen Abrieb der schützenden Rostschicht sein.
- Auf der Hinterfüllungsseite ist die Korrosion bei Spundwänden, die voll mit feinkörnigem Material hinterfüllt sind, normalerweise so gering, dass sie vernachlässigt werden kann.
- Auf der Hinterfüllungsseite muss aber mit erhöhter Korrosion gerechnet werden, wenn durch eine Drainage das Außenwasser (z. B. Seewasser) hinter die Spundwand gelangen kann, die Spundwand mit stark durchlässigem Material (z. B. Schotter) hinterfüllt oder aggressivem Grundwasser und/oder Boden (mikrobiell induzierte Korrosion) ausgesetzt ist.
- Ist die Spundwand beidseitig dem freien Wasser ausgesetzt, ist die Abtragsgeschwindigkeit mit dem Faktor 2 zu multiplizieren.

Auf der Basis von systematischen Untersuchungen an über 50 Bauwerken werden Erfahrungswerte für die Abtragsgeschwindigkeiten (bezogen auf eine 50-jährige Beobachtungszeit) in der Hauptkorrosionszone im Seewasserbereich von im Mittel 0,2 mm/Jahr und max. 0,5 mm/Jahr beobachtet. Für die Hauptkorrosionszone im Süßwasserbereich ergeben sich Erfahrungswerte für die mittlere Abrostung < 0,1 mm/Jahr und für die maximale Abrostung < 0,25 mm/Jahr. In dem dauernd unter Wasser liegenden Bereich unterhalb der Hauptkorrosionszone liegen die Mittelwerte im Seewasser in der Größenordnung von 0,08 mm/Jahr und im Süßwasser unter 0,04 mm/Jahr (bezogen auf eine 50-jährige Beobachtungszeit). Diese Werte können nur als grobe Anhaltswerte verstanden werden, da sich aufgrund der örtlichen Bedingungen erhebliche Abweichungen ergeben können. So gibt es im

Süßwasserbereich an zahlreichen Standorten Bauwerke, die über Jahrzehnte nahezu keine Korrosion aufweisen. Diese außergewöhnlich geringen Abtragsgeschwindigkeiten haben vermutlich ihre Ursache in der günstigen Zusammensetzung des Stahls und in der Ausbildung einer „natürlichen“ Schutzschicht, zu deren Bildung auch Wasserinhaltsstoffe beitragen können. Die Berechnung der Korrosivität erfolgt nach DIN 50929 „Abtragungsraten“.

Bei der Abschätzung der Nutzungsdauer einer Spundwand sind folgende Kriterien zu beachten:

- In der statischen Berechnung zur Ermittlung des Zeitpunktes der ersten Spannungsüberschreitungen infolge Korrosion sind die max. Biegemomente und die *mittleren* Abtragsgeschwindigkeiten anzusetzen, da die Spundwand ein Flächentragwerk ist.
- Für die Ermittlung des Zeitpunktes der ersten Durchrostungen ist die maximale Abtragsgeschwindigkeit in der Hauptkorrosionszone anzusetzen. In der Hauptkorrosionszone muss zusätzlich noch mit Mulden- und Narbenkorrosion gerechnet werden.

Infolge der Durchrostungen kann der hinterfüllte Boden ausspülen und Absenkungen an der Geländeoberfläche auslösen. Bei Bauwerken, bei denen die Geländeoberfläche hinter der Spundwand (z. B. mit einem Verbundpflaster) befestigt ist, bleibt der Oberflächenbelag zunächst über der Aufspülung unversehrt und bricht erst bei einer äußeren Beanspruchung (durch Fußgänger bzw. Fahrzeuge) zusammen. Durchrostungen in der Spundwand und Ausspülungen können deshalb ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen. Um dieses Sicherheitsrisiko möglichst klein zu halten, wird eine Überwachung des tatsächlichen Korrosionszustandes der Spundwandbauwerke durch Wanddickenmessungen (mit Ultraschall und durch Unterwasser-Inspektionen) empfohlen. Bei der Unterwasser-Inspektion durch Taucher sind auch Schäden durch Risse, Schlosssprünge usw. mit zu erfassen. Auf der Basis dieser Ergebnisse können die noch vorhandene Standsicherheit und die verbleibende Restnutzungsdauer der Spundwandbauwerke beurteilt werden. Zur Durchführung und zum Umfang von Wanddickenmessungen werden in ALBERTS (1987) Einzelheiten angegeben.

Das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden kann durch Beschichtung allein, besser in Kombination mit einem kathodischen Korrosionsschutz, wirkungsvoll verbessert werden. Ein „Korrosionsschutz“ durch die Wahl von Profilen mit größerer Wanddicke als statisch erforderlich hat sich jedoch im Küstenschutzbau in vielen Fällen aus wirtschaftlicher und aus baupraktischer Sicht als sinnvoll erwiesen.

Auch für das Korrosionsverhalten von Holmen, Gurten, Gurtholmen und Verankerungskonstruktionen müssen die für die Spundwand geltenden Einflussfaktoren sowie die Kontaktkorrosion beachtet werden.

Neben der Korrosion kann Sandschliff ebenfalls die Lebensdauer von ungeschützten Stahlspundwänden reduzieren. Aus diesem Grund können Stahlspundwände nach EAU-Empfehlung E 23 bei Sandschliffgefahr mit einer dauerhaften, verschleißfesten Beschichtung versehen werden.

9.4 Stahlpfähle

Sandschliff und Korrosionsgefahr sind in gleicher Weise zu beachten wie im Abschn. 9.3 angegeben.

9.5 Drahtnetze und Drahtgeflechte

Drahtkorbgeflechtbauweisen sind in den vergangenen Jahren oft als Bauhilfsmaßnahmen sowie gelegentlich als dauerhafte Bauwerke zur Anwendung gekommen.

Für bleibende Ausführungen ist ein langlebiger Korrosionsschutz des Drahtgeflechts von besonderer Bedeutung. Dieser ist besonders bei aggressiven oder stärker salzhaltigen Gewässern von Wichtigkeit.

Als Korrosionsschutz hat sich ein zink-aluminium-beschichteter Draht mit mindestens 260 g/m² Beschichtung und Drahtdurchmesser von mindestens 2,2 mm mit einer gesinterten PVC-Ummantelung, Mindeststärke 0,5 mm, bewährt.

Drahtschotterkörbe sind im Bereich der Außenelbe mit einer Standzeit von bisher 40 Jahren angewendet worden. Der natürliche Salzgehalt des Nordseewassers in diesen Gebieten beträgt ca. 2 ‰. Das entspricht etwa dem Salzgehalt der Ostsee. Auch im Bereich der Ostsee sind seit ca. 35 Jahren Drahtschottermatten (Flussmatratzen) in verschiedenen Dickenabmessungen hergestellt worden. Auch diese teilweise nicht beschichteten Körbe sind bisher nicht schadhaft.

Für den Bereich von kommunalen, kombinierten Küstenschutz- und Fremdenverkehrseinrichtungen sind Drahtkörbe auch aus Edelstahldraht verwendet worden.

Für die Befüllung der Drahtkörbe werden entweder standortgerechte Geröllmaterialien (Ostsee), Bruchgesteine aus Granit oder Mineralhüttenschlacken vorzugsweise der Größenklasse 0 eingesetzt (s. Tab. C 3).

Eine besondere Bauweise stellt das sogenannte „vegetative Deckwerk“ aus Drahtkörben dar. Diese Bauweise ist eine Kombination aus herkömmlichen Drahtschotterkörben (Flussmatratzen) und einer natürlich bewachsenen Böschung. Aus ökologischer Sicht wird diese Bauweise sehr positiv bewertet. Die Drahtkörbe werden entsprechend der anstehenden Belastung bemessen und mit gebrochenen oder runden natürlichen oder künstlichen Steinen befüllt. Bei dieser Bauweise erfolgt anschließend eine Auffüllung der Hohlräume mit Lava-Granulat, danach eine Begrünung mit vorgezogenen standortgerechten Pflanzen auf Kokosmatten oder mit Einzelpflanzen. Etwaiger, auch nur zeitweiliger Salzgehalt des Wassers in Tideflüssen kann die Begrünung erschweren bzw. verhindern.

10. Schriftenverzeichnis

Zu Abschnitt C 2: Boden

Für den Baustoff Boden wird auf das Schriftenverzeichnis in den Empfehlungen B 2002 „Geotechnische Untersuchungen von See- und Tidestromdeichen“ und Empfehlungen G 2002 „See- und Tidestromdeiche“ verwiesen.

Zu Abschnitt C 3: Natursteine

DIN 52 100: Auswahl und Bewertung von Natursteinen.

DIN 52 101: Probenahme.

DIN 52 102: Bestimmung der Dichte.

DIN 52 103: Bestimmung der Wasseraufnahme.

DIN 52 104: Frostbeständigkeit.

DIN 52 105: Druckversuch.

DIN 52 106: Beurteilungsgrundlagen für die Witterungsbeständigkeit.

TLW Bundesminister für Verkehr: Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine – Ausgabe 1997. EG Notifizierungsnummer 96/443/D.

BAW: Frostversuch nach dem Luftfrostverfahren, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW: Merkblatt über Verwendung von Natursteinen (Wasserbausteinen) für den Uferschutz an Binnenwasserstraßen; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Fassung August 1971.

BAW: Prüfrichtlinien zum Merkblatt über Verwendung von Natursteinen (Wasserbausteine) für den Uferschutz an Binnenwasserstraßen; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Fassung August 1971.

Ergänzende Literatur

- KEIL, K.: Frage der Frostbeständigkeit von Felsgesteinen. Die Natursteinindustrie, H. 1 und 2, 1970.
- KNISS, H.-G.: Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen in Binnenschiffahrtskanälen, 1983.

Zu Abschnitt C 4: Künstliche Steine

- DIN 4301: Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen (Für Steine aus Eisenhütten- und Metallhüttenschlacke sind die Vorschriften für Natursteine sinngemäß anzuwenden).
- BERTSCH, W. u. SEEHAUS, H.-M.: Einsatz von Schlackensteinen im Wasserbau – Bewertung der Ergebnisse von Ring-, Trog- und Perkolationsversuchen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 46 H. 1, 2002.
- GEBAUER, S.; GRUNDER, H.-T.; M KHORASANI, R.; LÜHR, H.-P. u. RIETH, U.: Eisensilikatgestein und Natursteine im Wasserbau. Binnenschiffahrt 56 H. 3., 2001.

Ergänzende Literatur

- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, Technisch-wissenschaftlicher Beirat: Deichsicherung durch Verhüttungsrückstände. Die Küste, H. 18, 1969.

Zu Abschnitt C 5: Beton

- Bauteilkatalog – Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile nach der neuen Normengeneration. 2. überarbeitete Auflage. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf, 2002.
- BAW: Merkblatt „Anwendung von hydraulisch und bituminös gebundenen Ausgussstoffen zum Teil- und Vollverguss von Steinschüttungen an Wasserstraßen“ (MAV). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1990.
- DIN EN 197 Zement: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Konformitätsbewertung.
- DIN 1164 Zement mit besonderen Eigenschaften.
- DIN EN 196 Prüfverfahren für Zement.
- DIN 4226 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel.
- DIN EN 932 Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
- DIN EN 933 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
- DIN EN 1097 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
- DIN EN 1367 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen.
- DIN EN 450 Flugasche für Beton.
- DIN EN 12878 Pigmente zum Einfärben von zement- und /oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfung.
- DIN 51043 Trass – Anforderungen, Prüfung.
- DIN 1045-1 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- DIN EN 206-1 Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- DIN 1045-3 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3: Bauausführung.
- DIN 1045-4 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und Überwachung von Fertigteilen.
- DIN 1048 Prüfverfahren für Beton.
- DIN EN 12350: Prüfung von Frischbeton.
- DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase.
- DIN EN 12390: Prüfung von Festbeton.
- DAfStb: Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel.
- DAfStb: Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag.
- DAfStb: Alkali-Richtlinie – Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton.

- DAfStb: Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton).
 DAfStb: Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau.
 DBV: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Merkblatt Betondeckung und Bewehrung.
 EAU: Empfehlungen des Ausschusses „Ufereinfassungen“. Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Verlag Ernst & Sohn, Berlin-München, 1990.
 EVU: Empfehlungen für die Verklammerung von Uferschutzwerken und Sohlsicherungen. Herausgeber Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln, 1990.
 Merkblatt für Deckwerksteine aus Beton für den Uferschutz. Schriftenreihe der Zementindustrie, FIZ, H. 38, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1971.
 Vorläufiges Merkblatt für Bodenverfestigung mit Zement im Wasserbau. Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ). Beton-Verlag, Düsseldorf, 1978.
 LEHMANN, K.: Einsatzmöglichkeiten von Hochofenzementen im Wasserbau. Beton-Informationen 38, H. 1., 1998.
 MÖBIUS, W. u. MARTINI, J.: Festlegung von Deckwerkssteinen durch Verblockung. Binnenschiffahrt 51, H. 9., 1996.
 MONNET, W.; DARTSCH, B. u. WEHEFRITZ, K. W.: Colcrete-Beton im Wasserbau. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1980.

Ergänzende Literatur

- ASTER, D.; JÜRGENS, H.-H. u. WEITZEL, H.: Bühnenbauten auf Borkum. Hansa 126, H. 21, 1989.
 BAYER, E.: Seebauwerke aus Beton. Beton 27, H. 1, 1977.
 BAYER, E.: Bühnen aus Betonfertigteilen für den Küstenschutz – Bauweisen und Entwicklungen. Betonwerk + Fertigteiltechnik 51, H. 9 und 10, 1985.
 BAYER, E.: Einsatz der Betonbauweise bei Offshore-Bauwerken. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 65, 1989.
 BRÖSKAMP, K.-H. et al.: Seedeichbau – Theorie und Praxis. Herausgeber Vereinigung der Nassbaggerunternehmungen e.V., Hamburg, 1976.
 BRUX, G.: Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendungsgebiete. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1961.
 ERCHINGER, H. F.: Küstenschutz durch Vorlandgewinnung – neue Baustoffe und Bauverfahren. Wasser und Boden 19, H. 10, 1967.
 ERCHINGER, H. F.: Ausbau des Wittmunder Außentiefs mit Leitdamm aus vorgefertigten Betonteilen. Hansa 126, H. 7, 1989.
 FRANCO, L.: Nuove applicazioni del calcestruzzo nelle strutture di difesa delle coste (Neue Anwendung von Beton bei Küstenschutzwerken). L'industria Italiana del Cemento, H. 1.
 HALLAUER, O.: Technische Eigenschaften von Sand-Zement-Schüttsteinen für den Wasserbau. Beton 27, H. 8, 1977.
 LAMPRECHT, H.-O.: Verwendung von Tetrapoden. Beton 12, H. 3, 1962.
 LAMPRECHT, H.-O.: Böschungsschutz (in: H. BLIND, Wasserbauten aus Beton. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau, Herausgeber H. KUPFER). Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1987.
 LOCHER, F. W.: Untersuchung des Betons von Uferschutzbauten auf Helgoland. Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1969.
 RECHENBERG, W.: Verhinderung und Beseitigung von Algen- und anderem Bewuchs auf Beton. Betontechnische Berichte. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1973.
 SCHRÖDER, H. TH.: Beton als Baustoff im Wasserbau. Wasser und Boden 27, H. 10, 1975.
 SCHUBENZ, D.: Bodenverfestigung mit Zement im Wasserbau. Wasser und Boden 24, H. 12, 1972.
 VINKELÖE, J. W.: Wasserundurchlässiger Beton – wasserundurchlässige Bauteile. Montanzement 5, H. 2, 1975.
 WALZ, D.: Dammbau und Böschungsverkleidung mit Boden-Zement-Verfestigung. Betontechnische Berichte 1973. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1974.

Zu Abschnitt C 6: Asphalt

- DIN EN 12507 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Terminologie.
 DIN 1995 Anforderungen an die Bindemittel, Teil 3 Bitumenemulsionen, Teil 4 Kaltbitumen.
 DIN EN 12591 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Anforderungen an Straßenbau-bitumen.

- DIN 1996: Prüfung von Asphalt, Teil 1–20.
 DIN EN 58 Probenahme bituminöser Bindemittel.
 DIN EN 1425 – DIN EN 1431 Prüfung von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln sowie DIN EN 12592 – DIN EN 12596 und DIN EN 12606 – DIN EN 12607.
 EAAW 83/96 Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau, 4. Ausg. 1983, 2. Aufl. 1996. Die 4. Ausg. befindet sich zzt. in einer grundlegenden Neubearbeitung. Sie wird voraussichtlich 2003 oder später vorliegen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik DGGT, Ak 2.3 und DVWK, AA 6.31 „Asphaltbauweisen im Wasserbau und in der Geotechnik“.
 TL-PmB: Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel, FGSV.
 ZTV: Asphalt-StB 01 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Bundesminister für Verkehr/FGSV.
 ZTV T-StB 95: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Bundesminister für Verkehr/FGSV.
 DE GROOT, P., GRUIS, H.J.: Recycling of Bituminous Mixes in Hydraulic Engineering in The Netherlands, 3rd Eurobitume Symposium 1985: Bitumen, Flexible and Durable, Vol. 1, V.15, den Haag, 1985.
 SAGGAU, W.; STADELMANN, R.: Ein Deich wird gebaut – Vordeichung Nordstrander Bucht. Eigenverlag Husum, 1989.

Zu Abschnitt C 7: Geokunststoffe

- BAW: Merkblatt zur Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG), Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.), Eigenverlag, Karlsruhe, 1993.
 DIN 16937: Kunststoffdichtungsbahnen aus weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid, bitumenverträglich.
 DVWK: Merkblatt zur Anwendung von Geotextilien im Wasserbau. Merkblatt Nr. 221, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1992.
 DVWK: Merkblatt zur Anwendung von Kunststoffdichtungsbahnen im Wasserbau und für den Grundwasserschutz. Merkblatt Nr. 225, Verlag Parey, Hamburg, Berlin, 1992.
 EAG-GTD: Empfehlungen EAG-GTD für die Anwendung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen (Betonmatten). Empfehlungen des Arbeitskreises AK 5.1 „Kunststoffe in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, in Vorbereitung für 2002.
 EBGEÖ: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. Empfehlungen des Arbeitskreises AK 5.2 „Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1997.
 EN ISO 10318: Geosynthetics – Geotextiles, Geotextile-Related Products, Geomembranes and Geosynthetic Clay Liners, Terms and Their Definitions. Trilingual Version, February 2001.
 SAATHOFF, F.; ZITSCHER, F.-F.: Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau. Grundbautaschenbuch: Teil 2 Geotechnische Verfahren, 6. Auflage, Seite 673–746, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001.
 WILMERS, W.: Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Merkblatt Nr. 535, 1994.
 ZITSCHER, F.-F. (Hrsg.): Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau. Empfehlungen des Arbeitskreises 14 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2. Auflage, Schriftenreihe des DVWK. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1989.

Zu Abschnitt C 8: Holz

- DIN EN 338: Bauholz für tragende Zwecke.
 DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken (Normenentwurf, 5-2000).
 DIN 1052, Teil 1: Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung.
 DIN 4026: Rammpfähle, Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung.

- DIN 4074, Teil 1: Gütebedingungen für Bauschneittholz (Nadelholz).
 DIN 4074, Teil 2: Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz).
 DIN 4076, Teil 1: Benennung und Kurzzeichen auf dem Holzgebiet, Holzarten.
 DIN 19657: Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen; Richtlinien.
 DIN 68364: Kennwerte von Holzarten, Festigkeit, Elastizität, Resistenz.
 DIN 68800: Holzschutz im Hochbau.
 EAU: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der HTG, Technische Gütezahlen überseeischer Harthölzer (E 163), 8. Auflage. Ernst & Sohn, Berlin, 1990.
 Verordnung zur Beschränkung des Herstellens, des Inverkehrbringens und der Verwendung von Teerölen zum Holzschutz (Teerölverordnung) vom 21. Mai 1991. Bundesgesetzblatt I, S. 1195, Jg. 1991.
 SCHÖNBECK, D. C.: Der Baustoff Holz im Wasserbau. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswasserbau, TU Hannover, (unveröffentlicht) 1976.

Ergänzende Literatur

- BAVENDAMM, W.: Welche Tropenhölzer sind gegen Meerwasserschädlinge resistent und können für den marinen Wasserbau empfohlen werden? Holz-Zentralblatt Nr. 12, 1959.
 BAVENDAMM, W. u. ROCH, W.: Untersuchungen über die natürliche Resistenz von Tropenhölzern gegen Meerwasserschädlinge. Holz als Roh- und Werkstoff, H. 3, 1970.
 BÜRGT, C.: Tropisches Hartholz im Wasserbau. Amsterdam, 1960.
 COTTON, K. E.: The Use of Timber in the Construction of Sea Defence and River Works. The Dock and Harbour Authority Nr. 430 und 431, 1956.
 HAHN, A.: Die Bekämpfung der Bohrmuschel. Die Küste H. 5, 1956.
 KOYEMANN, H. E. u. BELLMANN, H.: Die Verwendung von imprägnierten Hölzern im Wasserbau. Schiff und Hafen H. 9, 1954.
 KREMER, R.: Bongossi – ein bewährtes Bauholz mit vielen Verwendungsmöglichkeiten. Wasser und Boden 24, H. 8, 1972.
 KRUG, H. A.: Überseeische Harthölzer im Wasserbau. Schiff und Hafen H. 3, 1959.
 Küstenausschuss Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Bekämpfung der Bohrmuschel“: Zusammenstellung der tropischen Hölzer, die gegen marine Schädlinge (Bohrmuschel, Bohrasel) widerstandsfähig sind, (unveröffentlicht) 1961.
 MOMBÄCHER, R.: Die Verwendung von Holz im marinen Wasserbau. Holz-Zentralblatt Nr. 9, 1965.
 SANDERMANN, W. u. LANGE, W.: Studien über Wasserbauhölzer. Holzforschung H. 5, 1967.
 WENDEBORN, W.: Untersuchungen an Wasserbauhölzern und ihren Werkstoffen gegenüber Meeresschädlingen. Dissertation Universität Hamburg, 1967.

Zu Abschnitt C 9: Stahl

- Ausschuss für Korrosionsfragen der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. Hamburg: Korrosionsschutz von Stahlspundwänden. Deutsche Übersetzung der Mitteilung Nr. 5 des Havnekorrosionsudvalget (ATV), Glostrup/Dänemark, Dezember 1974.
 Ausschuss für Korrosionsfragen der HTG: Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau (KkiW). 2. Auflage. Hafenbautechnische Gesellschaft, Hamburg, 1989.
 Ausschuss für Korrosionsfragen der HTG: Empfehlungen für den Korrosionsschutz der Innenflächen von Hohlkörpern im Stahlwasserbau. Hansa 127, H. 9/10, 1990.
 DAST-Ri 007: Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbau – Lieferung, Verarbeitung, und Anwendung wetterfester Baustähle (Ausgabe November 1979).
 DIN 1199: Drahtgeflecht mit viereckigen Maschen.
 DIN 1200: Drahtgeflecht mit sechseckigen Maschen.
 DIN 1548: Zinküberzüge auf runden Stahldrähten.
 DIN 17100: Allgemeine Baustähle.
 DIN 18800, Teil 1: Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion.
 DIN 18800, Teil 7: Stahlbauten; Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen.
 DIN 18801: Stahlhochbau; Bemessung, Konstruktion, Herstellung. TL: für Stahlspundbohlen. Fassung 1985.
 DIN 50929: Korrosion von Metallen.
 EAU: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, 8. Auflage. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1990. E 20 Zulässige Spannungen bei Spundwandbauwerken

- E 23 Sandschliffgefahr bei Spundwänden
- E 35 Korrosion bei Stahlspundwänden und Gegenmaßnahmen
- E 67 Gütevorschriften für Stähle und Stahlspundbohlen
- E 97 Toleranzen der Schlossabmessungen bei Stahlspundbohlen
- E 98 Übernahmebedingungen für Stahlspundbohlen und Stahlpfähle auf der Baustelle
- E 99 Ausbildung geschweißter Stöße an Stahlspundbohlen und Stahlramppfählen
- E 107 Böschungen in Seehäfen und in Binnenhäfen mit Tide
- E 117 Wasserdichtheit von Stahlspundwänden.
- Grundbautaschenbuch, Teil 2, 3. Auflage. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1982.
- Spundwand-Handbuch, Berechnung, Hoesch AG Dortmund.
- Spundwand-Handbuch, Bauwerke. Hoesch AG Dortmund.
- ALBERTS, D. u. HEELING, W.: Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden – statistische Datenauswertung. Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 75, 1997.
- ALBERTS, D.: Wanddickenmessungen an Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Heft 60, 1987.
- ALBERTS, D.; EISSFELD, F. u. SCHUPPENER, B.: Beurteilung alter Spundwandbauwerke an den norddeutschen Küsten. Baugrundtagung 1986, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen, 1986.
- BINDER G.: Probleme der Bauwerkserhaltung – eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, BAW-Brief 1, Nov. 2001.
- HEIN, W.; LADEBURG, H.; MENNENÖH, S. u. SCHRÖDER, H. TH.: Untersuchungen über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafenwässern des deutschen Küstengebietes (Nord- und Ostsee). HTG-Jahrbuch 1975.

Ergänzende Literatur

- AGATZ, A. et al.: Bau der Stromkaje für das Containerkreuz in Bremerhaven. Die Bautechnik 49, H. 3, H. 5, H. 6 bis H. 10, 1972; BT 52, H. 2 und H. 3, 1975; BT 53, H. 5 bis H. 7, 1976.
- ALBERTS, D.: Ultraschallmessungen an stark korrodierten Stahlspundwänden. Hansa 128, H. 3, 1991.
- BEYER, H. A.: Großdock 8a – HDW Kiel. Die Tiefbau-Berufsgenossenschaft H. 11, 1976.
- BINDER, G. u. GRAFF, M.: Mikrobiell verursachte Korrosion an Stahlbauteilen; Werkstoffe und Korrosion 46, S. 639–648, 1995.
- BRACKEMANN, F.: Erfahrungen über Ausbildung und Einsatz von wellenförmigen Spundwänden mit großer Profilhöhe bei Kaimauern in deutschen Seehäfen. Baumaschine und Bautechnik, 18, H. 5, 1971.
- GRAFF, M.; KLAGES, D. u. BINDER, G.: Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) in marinem Milieu, Werkstoffe und Korrosion 51, 247–254, 2000.
- GRIMME, D.; VON OETEREN, K. A.; PÖTSCHKE, M. u. SCHWENK, W.: Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe im Hoch- und Ingenieurbau. 2. Korrosionum, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1976.
- HEIN, W.: Über das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden im Mittellandkanal. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, H. 59, 1986.
- HEIN, W.: Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser. Hansa 128, H. 3 und 4, 1991.
- ILLIGER, J.: Korrosionsuntersuchungen an Stahlspundwänden des Rhein-Herne-Kanals und des Dortmund-Ems-Kanals. Die Bautechnik 33, H. 6, 1956.
- PENSING, K.: Schwere wellenförmige Stahlspundwände im Hafenbau. Das Baugewerbe H. 18, 1973.
- STÜDEMANN, G.: Korrosion an Stahlspundwänden. Sonderheft Korrosionstagung, Schiff und Hafen, 1960.
- STÜDEMANN, G.: Korrosionsschutzmaßnahmen bei Stahlspundwänden im Wasserbau. Die Bautechnik 43, H. 10, 1966.
- UHLENDORF, H.-J. u. MARTIN, H.: 25 Jahre Kathodischer Korrosionsschutz im Hafen Stade – Bützfließ; Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft e. V., Bd. 51, 107–111, 1997.
- ULRICH, G.: Korrosionsschutz durch Luftentfeuchtung. Hansa 127, H. 5 und 6, 1990.
- WOLLIN, G.: Messung von Wanddicken an Spundbohlen mit Ultraschall. Schiff und Hafen, 1960.