



Bachelorarbeit

Auswirkungen von Meereis auf Gründungsstrukturen von Offshore – Windenergieanlagen

vorgelegt von

Jens Riechert

Matrikelnummer: 2019031

Studiengang: Umwelttechnik

Hamburg, 14.11.2014

Erstprüfer: Prof. Dr. Heiner Kühle

Zweitprüfer: Wirt.-Ing. (FH) Robert Vasold

Danksagung

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Herrn Robert Vasold für das Vertrauen, das mir geschenkt wurde und für die Möglichkeit, eigenständig an diesem Thema arbeiten zu können.

Besonderer Dank gilt auch allen Mitarbeitern der Offshore Abteilung von DNV GL – Energy in Hamburg, die bei Fragen oder Problemen immer ein offenes Ohr hatten und mich stets unterstützt haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Heiner Kühle für die Betreuung meiner Arbeit bedanken.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem im Ausgabeantrag formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Formelverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Meereis.....	5
2.1.1 Entstehung von Meereis	5
2.1.2 Eisformationen.....	10
2.1.3 Eigenschaften von Meereis.....	12
2.1.4 Eisstatistik	16
2.2 Offshore – Gründungsstrukturen.....	19
3 Auslegung von Offshore – Gründungsstrukturen.....	21
3.1.1 Anforderungen an Gründungsstrukturen.....	21
3.1.2 Lastfälle	22
4 Eislasten.....	23
4.1 Verfahren zur Ermittlung von Eislasten	23
4.2 Treibende Kräfte.....	25
4.2.1 Bewegungen durch thermische Ausdehnung.....	25
4.2.2 Bewegungen durch Wind und Meeresströmungen	26
4.3 Lastlimitierende Faktoren.....	28
4.3.1 Versagensmechanismen	28
4.3.2 Festigkeiten	32
4.4 Belastungsformen.....	35
4.4.1 Thermischer Eisdruck	35
4.4.2 Belastungen durch Treibeis	38

4.4.3	Dynamische Eislasten	47
4.4.4	Belastungen durch Tidenhub	50
5	Maßnahmen zur Reduzierung von Eislasten	51
5.1	„Ice – Cones“	51
5.1.1	Tests an „Ice – Cones“	52
5.1.2	Auslegung von „Ice – Cones“	55
5.1.3	Effizienz	56
5.1.4	Kosten	57
5.2	Weitere Reduzierungsmaßnahmen	60
5.2.1	Eissperren	60
5.2.2	Lokale Maßnahmen an der OWEA	61
6	Fazit und Zusammenfassung.....	62
7	Literaturverzeichnis.....	66

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
OWEA	Offshore – Windenergieanlage
OWP	Offshore – Windpark
DNV	Det Norske Veritas
GL	Germanischer Lloyd
API	American Petroleum Institute
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
STRICE	Structures on Ice
NRC	National Research Council
WS	Wasserstand

Formelzeichen

Kürzel	Bezeichnung	Einheit
ϑ	Temperatur des Eises	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_a	mittlere Eistemperatur	$^{\circ}\text{C}$
S_B	Salzgehalt des Eises	‰
V_B	Solevolumen	‰
ϕ_B	Porosität	‰
ρ_{Eis}	Dichte von Meereis	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
h	Dicke des Eises	m
K_{max}	Frostindex	–
$\vartheta_{a,\text{Luft}}$	mittlere Lufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$

α_{th}	thermischer Ausdehnungskoeffizient	$\frac{1}{\text{K}}$
L_0	Länge vor der Temperaturänderung	m
ΔL	Längenänderung durch Ausdehnung	m
$\Delta\vartheta$	Temperaturänderung	K
τ_{Wind}	Schubkraft des Windes	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
ρ_L	Dichte der Luft	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
c_{Wind}	Widerstandsbeiwert des Windes	–
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
F_{Wind}	Widerstandskraft des Windes	N
τ_{Strom}	Schubkraft der Strömung	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
A_{Scholle}	Fläche der Eisscholle	m^2
ρ_W	Dichte des Wassers	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
c_{Strom}	Widerstandsbeiwert der Strömung	–
u	Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
F_{Strom}	Widerstandskraft der Strömung	N
σ_c	Druckfestigkeit	MPa
ε	Dehnungsrate	$\frac{1}{\text{s}}$
σ_f	Biegefestigkeit	MPa
p_{th}	thermischer Eisdruck	$\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$
ϑ_0	Ausgangstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\dot{\vartheta}$	Geschwindigkeit der Temperaturänderung	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Std.}}$

$F_{h,max}$	maximale horizontale Eislast	MN
k_1, k_2, k_3	Koeffizienten für die Berechnung von $F_{h,max}$	–
D	Durchmesser auf Höhe der Wasserlinie	m
F_{global}	globale statische Eislast	MN
p_{global}	globaler Eisdruck	$\frac{MN}{m^2}$
c_R	Festigkeitsbeiwert	MPa
n	Koeffizient für die Berechnung von p_{global}	–
F_h	horizontale Kraft	MN
F_v	vertikale Kraft	MN
N	Normalkraft	MN
α	Neigungswinkel	°
μ	Reibungskoeffizient	–
$F_{h,Ral}$	horizontale Kraft nach RALSTON	MN
$F_{v,Ral}$	vertikale Kraft nach RALSTON	MN
A_1, A_2, A_3, A_4	Koeffizienten für die Berechnung von $F_{h, Ral}$	–
B_1, B_2	Koeffizienten für die Berechnung von $F_{v, Ral}$	–
D_T	Durchmesser am Ansatz des „Ice – Cones“	m
v_{Eis}	Treibgeschwindigkeit des Eises	$\frac{m}{s}$
f_n	Eigenfrequenz der OWEA	Hz
f_{Eis}	Bruchfrequenz des Eises	Hz
L_{Riss}	Risslänge beim Bruch durch Biegung	m
ζ	Koeffizient für die Berechnung von L_{Riss}	–
γ_w	Wichte von Wasser	$\frac{N}{m^3}$
F_{v,σ_s}	vertikale Kraft bei Tidenhub (begrenzt durch σ_s)	MN

σ_s	Scherfestigkeit	MPa
A_{Kontakt}	Kontaktfläche zwischen Eis und Gründungsstruktur	m ²
F_{v,σ_f}	vertikale Kraft bei Tidenhub (begrenzt durch σ_f)	MPa
g	Erdbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Δz	Tidenhub	m
V	Volumen	m ³
D_0	Durchmesser am breitesten Punkt des „Ice – Cones“	m
L_{Konus}	Länge des Konus	m
L_{Kragen}	Länge des Konuskragens	m
B	Konusbreite	m

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Schaden durch Meereis am Leuchtturm „Björnklacken“ (D = 2,9 m) im Jahr 1985.	2
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Gefriervorgänge bei Süßwasser (links) und Meerwasser (rechts) [4].	7
Abbildung 2-2: Beispiel für dunkle (dunkle Fläche) und helle Nilas (helle Fläche) (links) und Pfannkucheneis (rechts) [3].	9
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung eines Presseisrückens [8].	12
Abbildung 2-4: Beobachtungsstationen im Bereich der deutschen bzw. polnischen Ostsee [7].	17
Abbildung 2-5: Auftretswahrscheinlichkeit für Meereis in der südlichen Ostsee [7].	17
Abbildung 2-6: Eisdicken an verschiedenen Messstationen in der Ostsee [7].	18
Abbildung 4-1: Druckbruchversagen am Leuchtturm „Norstömsgrund“ (links), schematische Darstellung des Druckbruchversagens (rechts) [17].	29
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der beim Biegebruch ablaufenden Vorgänge [17].	30
Abbildung 4-3: Versagen durch Biegung am Leuchtturm „Norstömsgrund“ [17].	31
Abbildung 4-4: Druckfestigkeit von Meereis in Abhängigkeit vom Salzgehalt [6].	32
Abbildung 4-5: Biegefestigkeit von Meereis in Abhängigkeit vom Salzgehalt [6].	34
Abbildung 4-6: Thermischer Eisdruck nach Gleichung (4.8).	37
Abbildung 4-7: Lastprofil an einem Monopile mit 5 m Durchmesser beim Versagen durch Druck [19].	41
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der im Berechnungsbeispiel wirkenden Kräfte.	41
Abbildung 4-9: A: Kontakt zwischen Struktur und Eis. B: Versagen des Eises infolge von Biegung. C: Auftürmen von Eisblöcken an der Struktur [18].	43
Abbildung 4-10: Vereinfachte Darstellung der beim Aufprall auf ein geneigtes Bauwerk wirkenden Kräfte.	44
Abbildung 4-11: Koeffizienten für die Berechnung von Eislasten an konischen Strukturen [10].	45
Abbildung 4-12: Schematische Darstellung von Presseisrückens an einem nach oben (links) bzw. nach unten (rechts) geneigten Konus.	46
Abbildung 4-13 Gezacktes Lastprofil einer dynamischen Eisbelastung [1].	48

Abbildung 4-14: Faktor für die Berechnung der Risslänge [1].	49
Abbildung 5-1: „Ice – Cones“ im OWP "Nysted" [22].	51
Abbildung 5-2: Originalabmessungen der "Ice - Cones", die bei den Tests im NRC untersucht wurden [19].	52
Abbildung 5-3: Lastprofil eines um 55° geneigten "Ice - Cones" [19].	53
Abbildung 5-4: Maximale Eislast in Abhängigkeit vom Wasserstand und der Treibgeschwindigkeit [19].	54
Abbildung 5-5: Horizontale Eiskräfte auf senkrechte und geneigte Oberflächen [12].	56
Abbildung 5-6: Querschnittsskizze des für die Kostenermittlung berechneten "Ice - Cones"	57
Abbildung 5-7: Schematische Darstellung einer geneigten Eissperre [6].	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Beispiel für die Veränderung des Salzgehaltes von Meereis in Abhängigkeit von der Lufttemperatur [5].	5
Tabelle 2-2: Übersicht von Gründungsstrukturen in Abhängigkeit der Wassertiefe [11]. ..	19
Tabelle 3-1: Übersicht der für Eislasten relevanten Regelwerke.	21
Tabelle 4-1: Beispiele für die Druckfestigkeit von Meereis in Abhängigkeit der Wiederholungsperiode [1].....	33
Tabelle 4-2: Berechnung der maximalen statischen Eislast nach Gleichung (4.10).....	42
Tabelle 5-1: Zusatzkosten für einen um 55° geneigten Konus in Abhängigkeit des Durchmessers.	59

1 Einführung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die Auswirkungen von Meereis auf Gründungsstrukturen von Offshore – Windenergieanlagen (OWEA) zu erlangen. Dabei spielt insbesondere die Beschreibung der bei der Interaktion zwischen Meereis und Bauwerk ablaufenden Prozesse sowie die Darstellung der wirkenden Kräfte eine tragende Rolle. Weitere Hauptaspekte sind das Aufzeigen relevanter Kriterien für die Errichtung in Gebieten in denen Meereis auftritt sowie die Beschreibung möglicher Schutzmaßnahmen.

An OWEA, die in Gebieten mit sehr kalten Wintern wie zum Beispiel der Ostsee errichtet werden, kann es durch Meereis zu Schäden an der Anlage kommen. Das Ausmaß des Schadens hängt dabei im hohen Maß von den auf die OWEA einwirkenden Eislasten ab. Die Art und Größe der Lasten ist dabei von verschiedenen standortspezifischen Parametern abhängig [1]:

- Mechanische und physikalische Eigenschaften des Eises
- Art des Eises (Treibeis, geschlossene Eisdecke)
- Form der Gründungsstruktur
- Treibende Kräfte (Strömung, Wind, thermische Ausdehnung)
- Versagensverhalten des Eises bei Festigkeitsüberschreitungen

In der Vergangenheit konnten Schäden an maritimen Bauwerken wie Brückenpfeilern, Ölplattformen und Leuchttürmen beobachtet werden [2]. Als Beispiele seien an dieser Stelle die Leuchttürme „Nygrån“ und „Björnklacken“ genannt. Der Leuchtturm „Nygrån“ wurde im Jahr 1958 im nördlichen Teil des Bottnischen Meerbusens erbaut. Infolge zu hoher Eislasten kam es im Winter 1968/69 zum Bruch der Struktur und dadurch zum Umkippen des Turms [2]. Ein weiteres Beispiel ist der Leuchtturm „Björnklacken“. Der Turm wurde ebenfalls im Bereich des Bottnischen Meerbusens errichtet und hatte einen Durchmesser von 2,9 m. Um den Leuchtturm zu stabilisieren wurde das Schwergewichtsfundament zusätzlich durch Stahlketten am Meeresboden verankert. Trotz dieser Maßnahme kam es im April 1985 infolge hoher Treibeisbelastungen zu einer Verschiebung um 15 m, woraufhin sich der Turm um 12° neigte (s. Abbildung 1-1). Die bei der Interaktion wirkenden Eislasten, konnten anhand von Berechnungen auf ca. 11 MN festgelegt werden [2].



Abbildung 1-1: Schaden durch Meereis am Leuchtturm „Björnklacken“ (D = 2,9 m) im Jahr 1985.

Um Schäden solcher Art an OWEA zu vermeiden, muss die Anlage so ausgelegt werden, dass sie den aus Meereis resultierenden Eislasten widersteht. In arktischen Gebieten können die durch Meereis hervorgerufenen Lasten schnell zum maßgebenden Design – Parameter werden. Um Überdimensionierungen und einen damit verbundenen Kostenanstieg zu verhindern, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, um die wirkenden Eislasten zu reduzieren.

Da sich die Offshore – Windindustrie, gerade im arktischen Bereich, noch in den Kinderschuhen befindet, gibt es relativ wenige Informationen, die sich direkt auf OWEA beziehen. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb auch Erfahrungen aus anderen Industriezweigen wie zum Beispiel der Öl- und Gasindustrie verwendet. Diese Branchen haben seit vielen Jahren mit den Auswirkungen von Meereis an Gründungsstrukturen oder Plattformen zu kämpfen. Ob und inwieweit sich diese Erfahrungen auf die Offshore – Windenergiebranche übertragen lassen, wird ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Um die Auswirkungen von Meereis auf Gründungsstrukturen von OWEA beschreiben zu können, wurde die Arbeit in vier Hauptabschnitte unterteilt.

Im ersten Abschnitt werden die für diese Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen erläutert. Dabei wird zuerst der Frage nachgegangen, was Meereis überhaupt ist und wie es entsteht. Des Weiteren werden spezielle Eisformationen sowie die in Bezug auf Eislasten wichtigsten Eigenschaften von Meereis erläutert. Im Rahmen der Beschreibung der Eiseigenschaften werden auch Berechnungsansätze aufgezeigt, über die verschiedene Parameter wie die Dicke des Eises, das Solevolumen oder die Porosität berechnet werden können. Im nächsten Schritt wird das Aufkommen von Meereis im Bereich der deutschen Ostsee dargestellt. Dies geschieht anhand eines Eisatlanten, in dem das Eisauftreten über einen Zeitraum von 50 Jahren untersucht wurde. Als Abschluss des Kapitels werden einige Offshore – Gründungsstrukturen vorgestellt, die in arktischen Gebieten zum Einsatz kommen.

Im nächsten Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Auslegung von Offshore – Gründungsstrukturen beschrieben. Außerdem werden verschiedene Normen und Richtlinien, die für die Klassifizierung und Charakterisierung von Eislasten relevant sind, vorgestellt. Darauf folgt die kurze Beschreibung von Eislastszenarien, die durch unterschiedliche Belastungsformen hervorgerufen werden können.

Das vierte Kapitel befasst sich mit den bei der Interaktion zwischen Meereis und OWEA wirkenden Eislasten. Dabei werden im ersten Schritt unterschiedliche Verfahren vorgestellt, mit denen Eislasten ermittelt werden können. Im Weiteren wird das Kapitel in die drei Unterkapitel „Treibende Kräfte“, „Lastlimitierende Faktoren“ und „Belastungsformen“ unterteilt. Im Rahmen des Unterkapitels „Belastungsformen“ werden einige explizite Belastungsarten, welche an Gründungsstrukturen von OWEA auftreten können, dargestellt. Außerdem werden Berechnungsansätze aufgezeigt, mit denen es möglich ist, verschiedene Lastszenarien zu berechnen. Um die Genauigkeit solcher Lastberechnungen zu überprüfen, werden die Eislasten anhand einer Beispielrechnung mit den Ergebnissen aus Laborversuchen verglichen.

Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung von Eislasten vorgestellt. Es wird erläutert, welchem Ansatz die unterschiedlichen Reduzierungsmaßnahmen zugrunde liegen und wie sich dieser auf die Eislasten auswirkt. Im Unterkapitel „Ice – Cones“ wird die Effizienz anhand von Vergleichsmessungen genauer erläutert. Des Weiteren werden die durch „Ice – Cones“ entstehenden Zusatzkosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße dargestellt.

Im letzten Kapitel werden die über das Thema gewonnenen Erkenntnisse erläutert. Dabei wird insbesondere auf die unterschiedlichen Lastszenarien, die Genauigkeit von Berechnungsverfahren sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Reduzierungsmaßnahmen eingegangen. Außerdem werden die wichtigsten Inhalte dieser Arbeit noch einmal wiederholt und zusammenfassend dargestellt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Meereis

2.1.1 Entstehung von Meereis

Als Meereis wird das Eis bezeichnet, welches sich durch das Gefrieren von Meerwasser bildet. Es unterscheidet sich also von Eissorten wie Schelf- oder Gletschereis, die durch das Gefrieren von Süßwasser entstehen [3].

Gefrierprozess

Süßwasser gefriert bei einer Temperatur von 0 °C. Meerwasser hingegen, welches einen durchschnittlichen Salzgehalt von 34,7 ‰ aufweist, hat seinen Gefrierpunkt bei etwa -1,9 °C [4]. Generell gilt für den Gefrierpunkt von Meerwasser: Je salziger das Wasser, desto tiefer liegt der Gefrierpunkt unter der Null – Grad – Grenze. Die Nordsee liegt beispielsweise mit einem Salzgehalt von ca. 35 ‰ (1 ‰ entspricht 1 g Salz auf 1 kg Wasser) auf einem durchschnittlichen Niveau [3]. Der Salzgehalt von Meereis ist in der Regel geringer als der des Wassers und hängt von verschiedenen Faktoren ab [5]. Zum einen wird der Salzgehalt des Eises stark von der Gefriergeschwindigkeit beeinflusst.

Lufttemperatur in °C	-16	-28	-30	-40
Salzgehalt des Meereises in ‰	5,64	8,01	8,77	10,16

Tabelle 2-1: Beispiel für die Veränderung des Salzgehaltes von Meereis in Abhängigkeit von der Lufttemperatur [5].

Bei sehr tiefen Temperaturen kommt es zur schnellen Eisbildung, wobei durch die schnelle Gefriergeschwindigkeit größere Mengen an Salz eingeschlossen werden. Das bedeutet, dass der Salzgehalt bei sehr niedrigen Temperaturen maximale Werte annimmt (s. Tabelle 2-1 (Salzgehalte sind exemplarische Werte)). Zum anderen nimmt der Salzgehalt mit der Zeit ab. Grund hierfür ist, dass die im Eis enthaltenen Salzkristalle im Laufe der Zeit aufgrund ihrer höheren Dichte in Richtung des Eisbodens herausicksern (s. Kapitel 2.1.2) [5].

Kristallstruktur

Im Gegensatz zu Eis aus Süßwasser besitzt Meereis eine sehr komplexe Struktur. Es besteht aus einer festen, aus Wassermolekülen bestehenden Eismatrix. In dieser Eismatrix sind gasförmige Luftvolumina, flüssige salzhaltige Sole sowie feste Salzkomplexe eingeschlossen [3]. Durch das gasförmige und flüssige Medium bilden sich Porenräume, die sich in primäre und sekundäre Porenräume unterteilen. Die primären Porenräume entstehen bei der Eisbildung, wohingegen die sekundären Einschlussstrukturen durch Entsalzungs- und Schmelzprozesse während der Eisalterung entstehen [3]. Seine typisch poröse Struktur erhält das Meereis durch die Bildung von Solekanälen. Dabei „frisst“ sich die in den Porenräumen enthaltene Sole aufgrund der höheren Dichte in Richtung des Eisbodens, wobei winzig kleine Kanäle entstehen. Im Inneren des Eises entsteht dadurch ein Röhrensystem, welches mehr als 30 % des Gesamtvolumens einnehmen kann [4].

Meereis kann in Abhängigkeit von Druck und Temperatur mehr als ein Dutzend verschiedene Modifikationen annehmen. Bei Atmosphärendruck und unter natürlich auftretenden Temperaturen kristallisiert Wasser (H_2O) in Form einer hexagonalen Struktur. Die übrigen Erscheinungsformen treten nur bei sehr hohem Druck bzw. bei sehr niedrigen Temperaturen auf [3]. Im festen Zustand sind die Moleküle derart angeordnet, dass jedes Wasserstoffmolekül von vier Nachbarmolekülen umgeben ist. Dabei sind die Moleküle so angeordnet, dass die Sauerstoffatome der vier Nachbarmoleküle die Ecken eines nahezu idealen Tetraeders bilden. Die Sauerstoffatome bündeln sich in einer Serie von parallelen Ebenen, welche auch Basisebenen genannt werden und dem Eis seine typisch wabenähnliche Struktur verleihen [3].

Die Kristallstruktur des Eises bestimmt viele physikalische und mechanische Eigenschaften des Meereises, wobei die Anisotropie in Bezug auf Lasten an OWEA eine besondere Rolle spielt [3]. Anisotropie bedeutet, dass die Festigkeitseigenschaften des Eises im hohen Maß von der Richtung der einwirkenden Kräfte abhängen. Grund hierfür ist die Wachstumsrichtung des Eises. Wächst ein Eiskristall, ist es für ein neues Atom energetisch günstiger sich an bereits existierende Basisebenen anzulagern, als eine neue Ebene zu beginnen [3]. Durch diese bevorzugten Wachstumsrichtungen resultiert eine stabile und eine instabile Seite.

Die Anisotropie ist auch der Grund dafür, dass sich die einzelnen Schichten beim Auftreten von Schubkräften parallel gegeneinander verschieben, während der Kristall der Ausübung von Druckkräften gut standhalten kann [3].

Meereisbildung

Süßwasserseen besitzen eine stabile Schichtung [4]. Das bedeutet, dass sich das Wasser mit der größten Dichte (bei 4° C) im Bereich des Seebodens befindet und die darüberliegenden Schichten, Ebene für Ebene, eine niedrigere Dichte aufweisen (Abbildung 2-1, links). Wird das Oberflächenwasser durch die Atmosphäre auf 0 °C herunter gekühlt, setzt der Gefrierprozess ein wobei sich nach kürzester Zeit eine dünne Eisschicht bildet [4]. Bei salzhaltigen Gewässern ist das kältere Wasser jedoch dichter als das wärmere, was den Gefrierprozess verlangsamt.

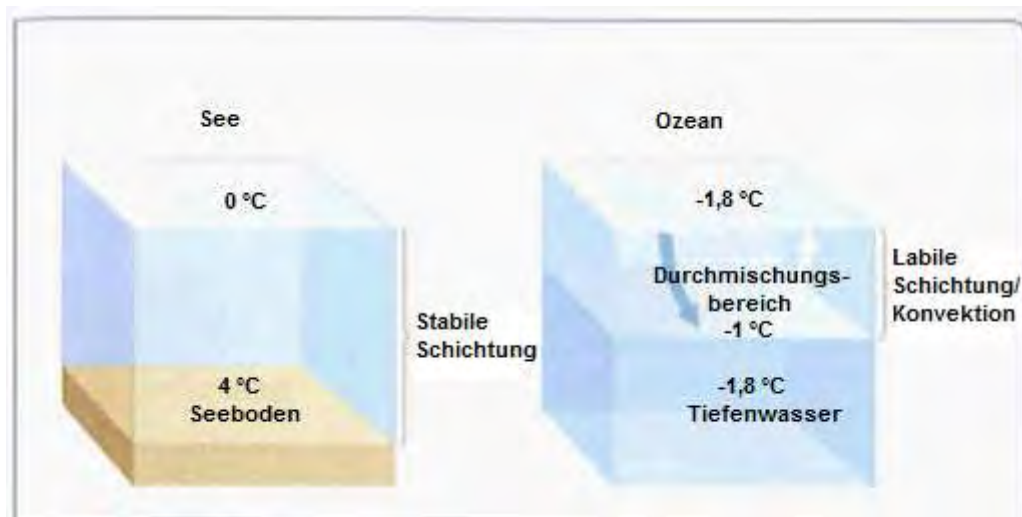


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Gefriervorgänge bei Süßwasser (links) und Meerwasser (rechts) [4].

Der Gefrierprozess beginnt im Winter, wenn das Oberflächenwasser des Meeres durch die Atmosphäre abgekühlt wird und den Gefrierpunkt erreicht [3]. Bevor es jedoch zum Kristallisationsprozess kommt, sinkt das kalte Wasser in tiefere Wasserschichten ab. Grund für das Absinken ist die Tatsache, dass sich die Dichte des Wassers durch die abnehmende Temperatur erhöht. Das kalte Wasser wird also schwerer.

Während des Sinkvorgangs wird warmes Wasser verdrängt und steigt nach oben. Der Sinkprozess währt so lange fort, bis das Wasser auf Tiefenwasser gleicher Dichte trifft (Abbildung 2-1, rechts). In der Folge kommt es durch Dichte- und Temperaturunterschiede zu einer Durchmischung der Wassersäule [3]. Dieser Kreislauf der Wasserumwälzung wird so lange fortgesetzt, bis der gesamte Durchmischungsbereich (meist ein paar Hundert Meter) auf Gefrieretemperatur abgekühlt ist [4]. In Abhängigkeit von Seegang und Wind kann es also Wochen dauern, bis sich Meereis bildet.

Ist der Gefrierpunkt in der gesamten Schicht erreicht, beginnt der Kristallisationsprozess und es bilden sich kleine Eiskristalle, die zur Wasseroberfläche aufsteigen. Das Aufsteigen der Eiskristalle ist nur möglich, da es beim Gefriervorgang zur Ausscheidung von Salzen kommt, woraufhin sich die Dichte der Eispartikel verringert [3]. Zuerst kommt es im ruhigen Bereich des Oberflächenwassers zur Bildung von Kristallplättchen. Als nächstes entstehen in vertikaler Wachstumsrichtung kleine Ärmchen, sodass der Kristall eine sternartige Form annimmt. Durch den Prozess der sogenannten „Kristallzüchtung durch Zusammenstoß“, wobei durch das Abbrechen der Kristallärmchen neue Eispartikel entstehen, kommt es zu einer raschen Neubildung von Eiskristallen. Im weiteren Verlauf bildet sich an der Wasseroberfläche eine matschige Eisschicht, die durch weitere Abkühlung von einer viskosen Flüssigkeit zu einem Feststoff heranwächst [3].

Wachstum von Meereis

Meereis kann im Gegensatz zu Süßwassereis im Laufe der Eisbildung die unterschiedlichsten Formen annehmen. Grund hierfür sind unterschiedliche Seegangs- und Windverhältnisse, die das Eis entweder in einer ruhigen oder in einer rauen Atmosphäre heranreifen lassen [4].

Bei ruhiger See ähnelt die Bildung von Meereis der Süßwassereisbildung. Hat das Wasser die Temperatur des Gefrierpunktes erreicht, entsteht nach kürzester Zeit eine großflächige durchsichtige Eisschicht, welche auch Nilas genannt wird [4]. Ist die Eisdecke noch dünner als fünf Zentimeter erscheint sie, aufgrund des darunterliegenden Meerwassers, dunkel (dunkles Nilas) (Abbildung 2-2, links). Im Laufe der Zeit wird das Eis durch aufsteigende Eiskristalle, die sich an der Unterseite der Nilas anheften, dicker und stabiler [3]. Während der Wachstumsphase nimmt der optische Effekt, welcher das Eis

dunkel erscheinen lässt, ab und es zeigt sich das typisch weiße Erscheinungsbild (Abbildung 2-2, links). Dieses helle Nilas kann in sehr kalten Regionen eine Dicke von 1,5 bis 2,0 m erreichen [3].



Abbildung 2-2: Beispiel für dunkle (dunkle Fläche) und helle Nilas (helle Fläche) (links) und Pfannkucheneis (rechts) [3].

Wird das Meer durch Wind und Wellen durchmischt, bilden sich in der durchmischten oberen Schicht bis zu 2 cm große Eisnadeln oder Eisplättchen. Aufgrund der geringeren Dichte steigen die Eispartikel an die Wasseroberfläche und bilden dort einen pfannkuchenförmigen Eisbrei der bis zu 70 cm dick werden kann (Abbildung 2-2, rechts) [3]. Werden diese Eisschollen durch Wind und Wellen übereinander geschoben, entstehen Eisdicken von bis zu 2 m, wobei sich erst nach mehreren Tagen eine kontinuierliche Eisdecke bildet [3].

Meereis kann im Laufe der Zeit die unterschiedlichsten Formen und Dicken annehmen. Das thermodynamische Wachstum wird dabei durch die Temperaturgradienten im Eis sowie die Gefriereschwindigkeit begrenzt, sodass durch den natürlichen Gefrierprozess maximale Eisdicken von wenigen Metern entstehen können [3]. Größere Eisdicken entstehen durch Bewegungen des Eises, wobei es durch Wind, Wellen und Strömungen zu Überlagerungen von Eisschollen kommen kann.

2.1.2 Eisformationen

Meereis kann im Ozean, je nachdem welche örtlichen und klimatischen Bedingungen herrschen, eine Vielzahl von Erscheinungsformen annehmen. Dabei wird das Eis hinsichtlich seines Alters, seiner Form und seiner Dicke unterschieden. Im Weiteren werden nur die in Bezug auf Offshore – Gründungsstrukturen wichtigsten Erscheinungsformen erläutert.

Einjähriges und mehrjähriges Meereis

Einjähriges Meereis entsteht während der kalten Wintermonate. Es verfügt über einen relativ hohen Salzgehalt und ist in seiner Festigkeiten recht porös [3]. Übersteht das Eis eine Schmelzperiode im Sommer, wird es zweijähriges bzw. mehrjähriges Meereis genannt [3]. Während der ersten Schmelzperiode verändern sich die mechanischen Eigenschaften des Eises. Dabei kommt es während der sommerlichen Schmelzperiode zur Ausscheidung von Salzen und somit zur Verringerung des Salzgehaltes, wodurch sich die Festigkeit des Eises erhöht [6].

Da sich die charakteristischen Eigenschaften von Meereis in der Regel nur während der ersten und zweiten Wachstumsphase deutlich verändern, kann auf eine Unterscheidung von zweijährigem und mehrjährigem Meereis verzichtet werden [3]. Im Weiteren ist deshalb nur noch von mehrjährigem Meereis die Rede. Mehrjähriges Meereis tritt heutzutage fast nur noch im Bereich des arktischen Ozeans auf. Grund hierfür ist die relativ ruhige Lage, welche aus dem Einschluss durch die Landmassen Grönlands, Sibiriens und Kanadas resultiert [3]. Außerdem schneit es in der Nordpolarregion weniger, wodurch das Eis aufgrund der fehlenden isolierenden Schneeschicht sehr kalt wird [3]. Die maximale Dicke, die mehrjähriges Meereis durch natürliches Wachstum erreichen kann, liegt bei ca. 3 m. Dies ist damit zu erklären, dass ab dieser Dicke die Schmelzprozesse ebenso schnell ablaufen wie die Bildungsprozesse [3].

Treibeis

Aufgrund der begrenzten Dicke von Meereis unterliegt das Eis einer ständigen Belastung durch Wind und Strömungen. Im Zuge dieser Belastungen kann es zum Bruch des Eises kommen [3]. Die daraus resultierenden Eisschollen können je nach Strömungs- und Windrichtung in verschiedene Regionen des Meeres abdriften, wodurch eine Kollision mit OWEA nicht ausgeschlossen werden kann. Als Beispiel sei hier das sogenannte Arkona – Becken, in dem unter anderem die Windparks „Arkona Becken Südost“, „Adlergrund“ und „Arcadis Ost“ errichtet werden sollen, genannt. Kommt es im Bereich der Greifswalder Oie zur Eisbildung und weht der Wind aus südlicher Richtung, kann es zur Kollision von Eisschollen mit Anlagen dieser Offshore – Windparks (OWP) kommen [7].

Packeis und Presseisrücken

Beim Packeis handelt es sich um auseinandergebrochene Eisfragmente, die jedoch nicht wie beim Treibeis auseinanderdriften, sondern einen dichten, mit Wasserrillen durchsetzten, Eisschollenteppich bilden [3]. In Regionen in denen Pack- oder auch Treibeis auftritt, kann es durch die Veränderung von Driftrichtung und Driftgeschwindigkeit zu Zusammenstößen von Eisschollen kommen. Beim Zusammenstoß zweier Eisschollen treten hohen Kräfte auf, wobei es zu Überlagerungen von Eisfragmenten kommen kann [3]. Diese Eisformationen werden Presseisrücken genannt und stellen aufgrund ihrer Größe eine besondere Gefahr für OWEA und andere maritime Bauwerke dar [8].

Presseisrücken können auch durch thermische Spannungen in einer geschlossenen Eisdecke entstehen. Dabei kommt es durch thermische Ausdehnung zu Rissen im Eis (s. Kapitel 4.2.1). Durch Tidenhub, Wellen und Strömung kann es dann zu Überschiebungen von Eisplatten kommen [8].

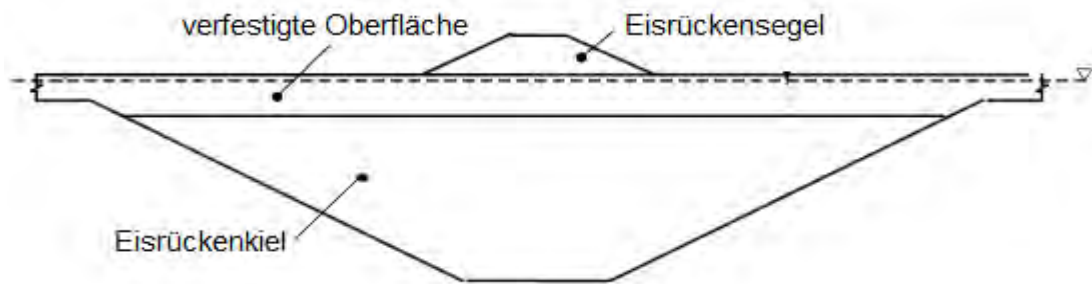


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung eines Presseisrückens [8].

Je nach Größe und Qualität der Eisschollen, sowie der wirkenden Kräfte, bildet sich nach einer gewissen Zeit eine charakteristische Form aus (s. Abbildung 2-3) [8]. Das Eisrückensegel bildet die Oberseite der Formation und kann im Bereich der nördlichen Ostsee eine Höhe von bis zu 2 m erreichen. Der Teil unter der Wasseroberfläche wird Eisrückenkiel genannt, wobei hier deutlich größere Werte von bis zu 10 m und mehr erreicht werden können [8]. Den Mittelteil der Presseisrücken bilden Eisschollen, die zu einer verfestigten Oberfläche von wenigen Metern zusammenwachsen [8].

Häufig kommt es in Gebieten mit geringer Wassertiefe oder vor maritimen Bauwerken, an denen sich die Eisfragmente aufstapeln können, zur Bildung von Presseisrücken [8]. Neu formierte Presseisrücken haben jedoch einen relativ geringen Einfluss auf die Belastungen von OWEA, wohingegen ältere Presseisrücken eine Gesamtdicke von bis zu 25 m (Bottnischer Meerbusen) erreichen und somit zum maßgebenden Lastfall werden können [8].

2.1.3 Eigenschaften von Meereis

Die Auswirkungen von Meereis auf Gründungsstrukturen von OWEA hängen im hohen Maß von den physikalischen bzw. mechanischen Eigenschaften des Eises ab. Im Folgenden werden die in Bezug auf Eislasten wichtigsten Eigenschaften dargestellt. In der Literatur gibt es eine ganze Reihe von Berechnungsansätzen mit denen die Eigenschaften von Meereis beschrieben werden können. Im Rahmen dieses Kapitels wird eine Auswahl der Ansätze vorgestellt.

Temperatur

Die Temperatur des Eises (ϑ) variiert sehr stark und ist im Wesentlichen von der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Schneedecke auf dem Eis abhängig [9]. Kommt es im Winter zur Bildung von neuem Meereis, gleicht das Temperaturprofil meist einer Geraden. An der Oberseite des Eises herrschen Temperaturen, die denen der Lufttemperatur entsprechen. An der Unterseite stellt sich eine Temperatur nahe des Gefrierpunktes ein [9]. Daraus folgt, dass sich ein Temperaturgefälle von der Eisoberseite zur Eisunterseite einstellt [6].

Das Temperaturprofil von altem Eis nimmt eine nichtlineare Form an. Die Temperaturkurve ist dabei im großen Maß von den Lufttemperaturen während der Gefrierphase, dem Salzgehalt und der Struktur des Eises abhängig [6]. Ein weiterer Faktor, welcher das Temperaturprofil beeinflusst, ist die Dicke des Eises. Diese spielt gerade im Sommer, wenn es durch milde Lufttemperaturen zur Eisschmelze kommt, eine entscheidende Rolle [9].

Salzgehalt

Wie schon in Kapitel 2.1.1 erwähnt, spielt der Salzgehalt des Meeres eine entscheidende Rolle für den Gefrierpunkt. Während des Gefrierprozesses kommt es zur Ausfällung von Salzen, sodass der Salzgehalt des Eises (S_B) auf typische 3 – 5 ‰ absinkt [3]. Die Salze treten innerhalb der Eisstruktur als flüssige Sole, die sich in Kavernen ablagert, auf. Grund hierfür ist, dass die Salzmoleküle aufgrund ihrer Größe nicht in der Kristallstruktur aufgenommen werden können. Der feste Teil der Eisstruktur ist dementsprechend quasi salzfrei [6].

Der Salzgehalt von Meereis hängt neben dem Salzgehalt des Wassers auch vom Alter und der Dicke des Eises ab [9]. Einjähriges Meereis hat beispielsweise einen höheren Salzgehalt als mehrjähriges Eis (s. Kapitel 2.1.2 (Packedeis und Presseisrücken)) [9]. Die Dicke des Eises spielt insofern eine Rolle, als das Salz bei größeren Dicken länger benötigt, um aus dem Eis heraus zu sickern.

Solevolumen

Das Volumen der Sole (V_B), welches in den Kavernen der Eisstruktur eingeschlossen ist, beeinflusst die Porosität und Dichte des Eises [6]. Die Berechnung kann über den Salzgehalt nach vollständigem Eiswachstum (S_B) und über die durchschnittliche Eistemperatur (ϑ_a) erfolgen [6]:

$$V_B = 41,64 \cdot S_B^{0,88} \cdot |\vartheta_a|^{-0,67} \quad (2.1)$$

Bei erst vor Kurzem entstandenem Meereis sind die Hohlräume vollständig mit Sole gefüllt. Dementsprechend hoch ist das Solevolumen. Im Laufe der Zeit verringert sich die Flüssigkeit aufgrund der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Effekte auf typische 20 – 100 % [6].

Porosität und Dichte

Die Porosität (ϕ_B) ist ein Maß für die Beschreibung von Luft-, Schmutz- und Soleeinschlüssen innerhalb der Eisstruktur. Diese Einschlüsse beeinflussen das mechanische Verhalten von Meereis, was die Porosität zu einem wichtigen Faktor für die Beschreibung von Eislasten macht [6]. Wie das Solevolumen, kann auch die Porosität über den Salzgehalt (S_B) sowie die durchschnittliche Eistemperatur (ϑ_a) berechnet werden [6]:

$$\phi_B = 19,37 + 36,18 \cdot S_B^{0,91} \cdot |\vartheta_a|^{-0,69} \quad (2.2)$$

Die Dichte von Meerwasser (ρ_W) hängt stark von der geographischen Lage des Meeres ab. Da die Dichte des Wassers bei der Berechnung von Eislasten jedoch einen relativ geringen Einfluss ausübt, kann ein Standardwert von $1028 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen werden [6]. Die Dichte von Meereis (ρ_{Eis}) hängt ebenfalls stark von den örtlichen Gegebenheiten, welche zum Beispiel durch den Salzgehalt und die vorherrschende Lufttemperatur beschrieben werden, ab. Typische Werte liegen dabei zwischen 912 und $925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [6].

Festigkeiten

Die Festigkeit von polykristallinem Eis hängt von verschiedenen Parametern wie zum Beispiel der Temperatur, dem Salzgehalt, der Porosität, der Entstehungsgeschichte des Eises und von der Belastungsrichtung ab [5]. Festigkeiten lassen sich in Druck, Zug, Biegung, Scherung und Adhäsion unterteilen. Die Charakterisierung erfolgt dabei über das Versagensverhalten bei Maximalbelastung, welches als duktiler Versagen bei sich verringernden Belastungen oder als Bruch infolge von Rissbildung erfolgen kann [5]. Die Art, mit der Meereis an einer OWEA versagt, spielt eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung von Eislasten. Die Druckfestigkeit von Eis ist beispielweise deutlich höher als die Biegefestigkeit, sodass es beim Versagen durch Druck zu wesentlich höheren Lasten kommt. Eine detailliertere Beschreibung sowie Berechnungsansätze zur Ermittlung von Druck- und Biegefestigkeiten können in Kapitel 4.3.2 nachgeschlagen werden.

Eisdicke und Frostindex

Neben der Festigkeit des Eises sind die Auswirkungen, die durch Meereis an OWEA entstehen können, von einer weiteren Eigenschaft des Eises abhängig. Die Dicke des Eises (h) kann mithilfe unterschiedlicher Verfahren, wie zum Beispiel elektromagnetischer Sonden (EM-Bird) oder über Stichproben, ermittelt werden. Des Weiteren kann die Eisdicke über den sogenannten Frostindex berechnet werden. Der Frostindex beschreibt die Summe der Tage eines Jahres, an dem die mittlere Tagestemperatur ($\vartheta_{a,Luft}$) unter 0 °C liegt. Die Berechnung der Eisdicke und des Frostindex kann über folgende Gleichungen erfolgen [1]:

$$h = 0,032 \cdot \sqrt{0,9 \cdot K_{\max} - 50} \quad (2.3)$$

mit
$$K_{\max} = \sum_{\text{Tage}} |\vartheta_{a,Luft}(\text{Tage})|, \vartheta_{a,Luft} < 0\text{ °C} \quad (2.4)$$

Für einen Zeitraum von 5 Tagen, an denen durchschnittliche Tagestemperaturen von -12 °C , -19 °C , $+2\text{ °C}$, -15 °C und -12 °C gemessen wurden, ergibt sich beispielsweise ein Wert von $K_{\max} = 58$. Daraus folgt nach dem oben genannten Berechnungsansatz eine Eisdicke von $h = 0,047\text{ m}$.

Die für die Auslegung von OWEA relevante Eisdicke sollte aus langjährigen, statistischen Werten hergeleitet werden [10]. Dabei sollte bei OWP, die sich im offenen Meer befinden, die maximale Eisdicke der letzten 50 Jahre verwendet werden. Für OWP nahe der Küste, wird bei einer fest geschlossenen Eisdecke ebenfalls der Maximalwert der letzten 50 Jahre verwendet, wohingegen bei Treibeis die Eisdicke eines „normalen“ Winters angenommen werden kann [10].

2.1.4 Eisstatistik

Für die Schifffahrt spielt die Aufzeichnung von relevanten Eisparametern, zum Beispiel für die Routenplanung, schon lange eine wichtige Rolle. Da es sich bei OWEA um feststehende Bauwerke handelt, kann es in arktischen Regionen zur Interaktion zwischen OWEA und Meereis kommen, sodass das Auftreten von Meereis schon bei der Planung eines OWP berücksichtigt werden muss. Dementsprechend müssen verschiedenste Eisparameter, wie zum Beispiel die Auftrittswahrscheinlichkeit von Meereis oder die Eisdicke, berücksichtigt werden.

Wie schon in Kapitel 2.1.3 (Eisdicke und Frostindex) erläutert, können Eisdicken mithilfe verschiedenster Verfahren ermittelt werden. Die Fläche von geschlossenen Eisdecken oder Eisschollen, Eisformationen und die Wahrscheinlichkeit das Meereis über einen bestimmten Zeitraum in einer Region auftritt, wird heutzutage über die Auswertung von Satellitenbildern oder mithilfe von Beobachtungsstationen ermittelt. Oftmals werden langjährige Ergebnisse in sogenannten Eisatlanten, die von den zuständigen Forschungseinrichtungen erstellt werden, dargestellt.

In Deutschland ist das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) für die Analyse des Eisaufkommens in der deutschen Ostsee verantwortlich [7]. Bei der Analyse des Eisaufkommens werden verschiedenste Eisparameter anhand von 14 Beobachtungsstationen aufgezeichnet (s. Abbildung 2-4) [7].



Abbildung 2-4: Beobachtungsstationen im Bereich der deutschen bzw. polnischen Ostsee [7].

Das BSH fasst die Ergebnisse der Beobachtungen in einem im Jahr 2012 erschienenen Eisatlas zusammen [7]. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einem Beobachtungszeitraum von 50 Jahren (1961 – 2010) und umfassen neben Auftretswahrscheinlichkeiten auch Angaben über die Dicke des Eises.

Das Auftreten von Meereis unterliegt in der deutschen Ostseeregion starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen [7]. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Großwetterlagen über Europa. Im Herbst und Winter überwiegen Großwetterlagen mit Winden aus westlicher Richtung. West – Winde führen milde atlantische Luftmassen nach Mitteleuropa, wodurch sich die Ostsee nicht nennenswert abkühlt. Kommt es im Winter allerdings zu östlichen Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten, kühlt das Wasser schnell ab und es kommt zur Meereisbildung [7].

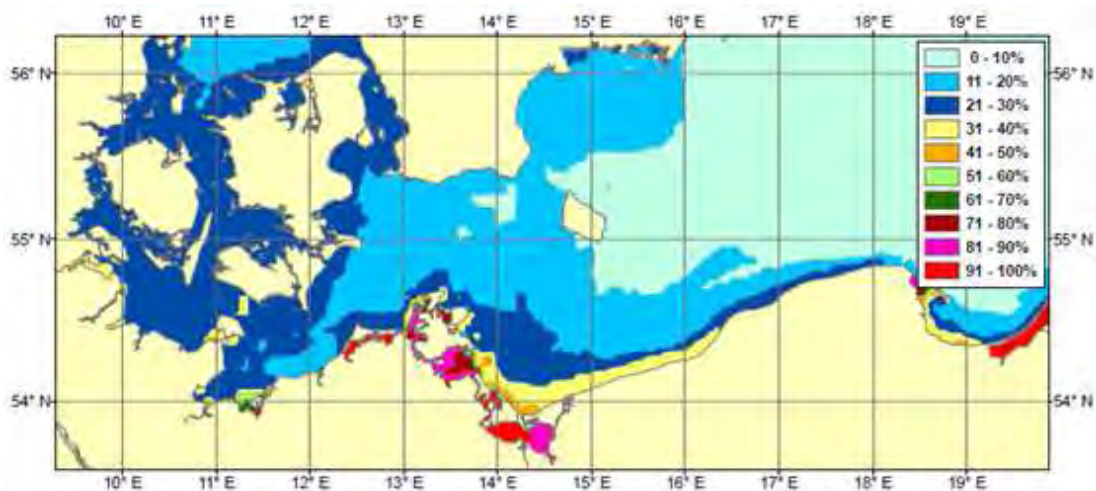


Abbildung 2-5: Auftretswahrscheinlichkeit für Meereis in der südlichen Ostsee [7].

In Abbildung 2-5 ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Meereis in der südlichen Ostsee dargestellt [7]. Hohe Wahrscheinlichkeiten treten im Bereich der Küste, insbesondere im Greifswalder Bodden, dem Stettiner Haff und im Frisches Haff auf. Im offenen Meer liegen die Wahrscheinlichkeiten mit 10 bis 30 % deutlich unter den Werten im Küstenbereich. In den Gebieten östlich von Fehmarn und dem Arkona – Becken, in denen ein großer Teil der deutschen Ostsee – Windparks errichtet werden soll, kommt es im Durchschnitt in jedem dritten Winter zur Eisbildung, wobei die Aufenthaltsdauer des Eises im Mittel bei 9 Tagen liegt [7].

Wie schon erwähnt, ist die Dicke des Eises ein weiterer auslegungsrelevanter Parameter, der bei der Planung von OWP berücksichtigt werden muss.

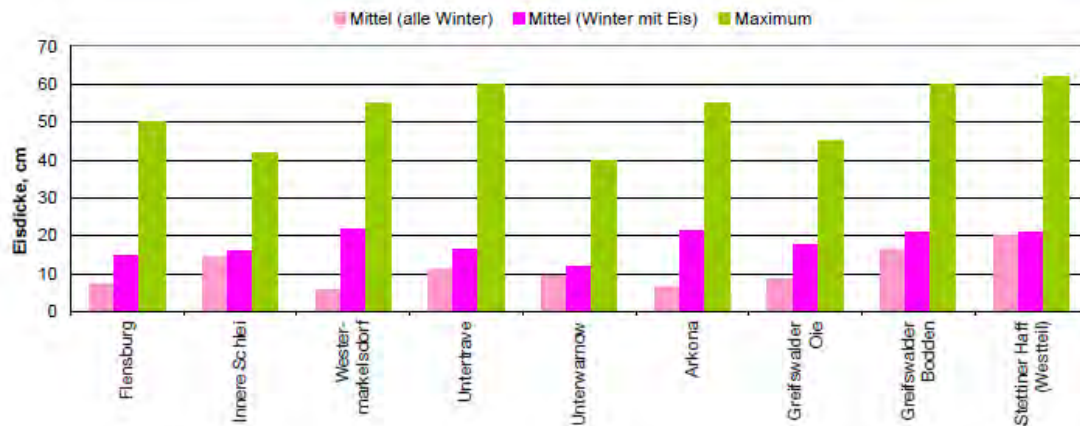


Abbildung 2-6: Eisdicken an verschiedenen Messstationen in der Ostsee [7].

Der größte Teil der ausgewerteten Daten enthält Eisdicken unter 30 cm (s. Abbildung 2-6). In starken bis sehr starken Wintern, wie es zum Beispiel im Winter 1962/63 der Fall war, können jedoch auch ebene Eisflächen mit einer Dicke von bis zu 70 cm entstehen. Diese maximalen Eisdicken traten im Rahmen der Beobachtungen des BSH im Bereich der Kieler und Lübecker Bucht sowie im Seegebiet rund um Rügen auf [7]. Dabei ist zu beachten, dass das Eis durch Überlagerung von Eisschollen auch in der östlichen Ostsee weitaus größere Dicken annehmen kann. Beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Umstände (entsprechende Strömungs- und Windrichtungen) entstehen somit in einigen Bereichen außerhalb der Küste sehr schnell Presseisrücken mit einer Höhe von bis zu 3 m [7].

2.2 Offshore – Gründungsstrukturen

Neben den physikalischen Eigenschaften des Eises sind die Auswirkungen von Meereis auf OWEA von der Form der Gründungsstruktur abhängig. Folgende Gründungsstrukturen werden je nach Wassertiefe eingesetzt [11]:

Gründungsart	Wassertiefe in m
Schergewichtsründung	bis 30
Monopiles	bis 30
Tripods	bis ca. 40
Jackets	bis ca. 60
Schwimmende Fundamente	> 60

Tabelle 2-2: Übersicht von Gründungsstrukturen in Abhängigkeit der Wassertiefe [11].

Im Weiteren werden schwimmende Fundamente nicht weiter erläutert, da diese aufgrund zu hoher Kosten zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht wirtschaftlich sind [11]. Im Bezug auf Meereis lassen sich die in Tabelle 2-2 beschriebenen Gründungsstrukturen in zwei Gruppen unterteilen:

- Monopiles, Tripods und Schergewichtsfundamente weisen im Bereich des Eisangriffs die Form eines vertikalen Pfahls auf [12].
- Jacket – Strukturen bestehen aus drei bis vier Stahlbeinen, die untereinander durch Querverstrebungen verbunden sind. Somit ähnelt das Bauwerk im Bereich des Eisangriffs eines querverstrebten Fachwerks [11].

Bei vertikalen Pfählen wird die Angriffsfläche des Eises durch den Durchmesser auf Höhe der Wasserlinie beschrieben. Kommt es im Gegensatz dazu an Jacket – Strukturen zur Interaktion mit Meereis muss aufgrund der Verstrebungen, die das Aufstauen von Meereis begünstigen, die komplette Breite des Bauwerks berücksichtigt werden [12]. Darüberhinaus kann es zu weiteren Ansammlungen von Meereis kommen, wodurch sich die effektive Breite des Bauwerks weiter erhöht. Die vergrößerte Angriffsfläche führt zu einer theoretischen Erhöhung der Eislasten [12].

In Bezug auf Eislasten sind Jacket – Strukturen aufgrund ihrer relativ großen Angriffsfläche nur bedingt geeignet, wohingegen Belastungen durch Wellen eher gering ausfallen [11]. Generell sollte daher bei der Gründung von OWEA in arktischen Gebieten die Gründungsstruktur ausgewählt werden, die dem Mix der örtlichen Witterungsbedingungen am besten widersteht.

Im Weiteren, insbesondere bei den Berechnungsansätzen in Kapitel 4, wird sich auf die Auswirkungen von Meereis an vertikalen Gründungspfählen wie Monopiles beschränkt.

3 Auslegung von Offshore – Gründungsstrukturen

Bei der Auslegung von OWP werden im ersten Schritt die Standortbedingungen von einem Prüfsachverständigen dargestellt und bewertet. Das daraus resultierende Gutachten sollte folgende Daten enthalten [13]:

- Standort und Konfiguration des OWP mit Koordinaten für alle OWEA
- Baugrundeigenschaften
- Winddaten
- Informationen über maritime Bedingungen wie Wellenhöhen, Gezeiten, Strömung, Kolkbildung und Eisgang

Darüber hinaus sollten weitere Angaben, wie beispielsweise die Definition der dimensionierenden Lastfälle, die Festlegung von anzuwendenden Normen und Richtlinien für die Bemessung und die Beschreibung besonderer Nachweismethoden, berücksichtigt werden [13].

3.1.1 Anforderungen an Gründungsstrukturen

Die Gründungsstrukturen von OWEA sollten so ausgelegt werden, dass sie den aus Meereis resultierenden Lasten sowie der Kombination verschiedener Belastungsformen widerstehen. Informationen, die für die Klassifizierung und Charakterisierung von Eislasten relevant sind, können in folgenden Regelwerken nachgeschlagen werden:

IEC 61400 – 3: Wind turbines Part 3: Design requirements for offshore wind turbines
GL Guideline for the Construction of Fixed Offshore Installations in Ice Infested Waters
DNV – OS – J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures
DIN EN ISO 19906
API Recommended Practice 2N: Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions

Tabelle 3-1: Übersicht der für Eislasten relevanten Regelwerke.

3.1.2 Lastfälle

Die Bewertung von Lastfällen sollte vor der Simulation und Berechnung der Lastannahmen durch einen unabhängigen Prüfsachverständigen durchgeführt werden. Dabei müssen alle Lastfälle, die zum Nachweis der „strukturellen Integrität“ der OWEA erforderlich sind, berücksichtigt werden. Grundsätzlich kann zwischen zwei Lastarten unterschieden werden [13]:

- Betriebsfestigkeitslasten zum Nachweis der Betriebsfestigkeit
- Extremlasten zum Nachweis der allgemeinen Standsicherheit

OWEA werden für einen Betrieb von mindestens 20 Jahren ausgelegt. Dementsprechend müssen die Betriebsfestigkeitslasten den Betrieb der OWEA über eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahre repräsentieren [13]. Als Extremlasten werden Lasten bezeichnet, die während einer bestimmten Wiederholungsperiode nur sehr selten auftreten [13]. In Bezug auf Meereis sind dies zum Beispiel extrem hohe Lasten, die durch außergewöhnlich große Eisdicken entstehen. Ein weiterer Punkt, der bei der Bewertung von Lastfällen berücksichtigt werden muss, ist das dynamische Verhalten und die damit verbundenen Schwingungen der Anlage.

Generell lassen sich Belastungen von OWEA in verschiedene Szenarien einteilen. Folgende Belastungsformen durch Meereis können dabei auftreten [5]:

- **horizontale Kräfte** durch
 - Treibeis in Form von Druck- und Druckstoßbelastungen oder
 - Ausdehnung der Eisdecke in Form des thermischen Eisdrucks.
- **vertikale Kräfte** durch
 - Tidenhub und anhaftendes Eis.

Die in Tabelle 3-1 aufgeführten Regelwerke enthalten explizite Lastfälle, die bei der Berechnung von Eislasten berücksichtigt werden sollten. Einige dieser Szenarien werden im Rahmen des Kapitels 4.4 genauer erläutert.

4 Eislasten

Kommt es zum Kontakt zwischen Offshore – Gründungsstrukturen und Meereis können je nach Interaktionsart horizontale und/oder vertikale Lasten auf die Anlage einwirken. Dabei kann es sowohl zu statischen als auch zu dynamischen Belastungen kommen. Die Art und Größe der auf die Struktur einwirkenden Kräfte hängt von verschiedenen standortspezifischen Parametern ab. Dazu gehören die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Eises, die Eisdicke, die Form der Gründungsstruktur und die das Eis in Bewegung versetzenden Kräfte. Um die für die Auslegung von OWEA relevanten Betriebsfestigkeitslasten sowie Extremlasten ermitteln zu können, ist außerdem ein umfangreiches Wissen über die Art des Eisversagens am Bauwerk nötig.

4.1 Verfahren zur Ermittlung von Eislasten

Eisbelastungen an OWEA können über verschiedene Verfahren ermittelt werden. Zum einen gibt es in Normen und Standards eine ganze Reihe von Berechnungsverfahren, über die verschiedene Lastszenarien berechnet werden können (s. Kapitel 4.4). Diese Berechnungsansätze basieren in der Regel auf experimentellen Untersuchungen [5].

Zum anderen besteht die Möglichkeit, Eislasten direkt an bestehenden Bauwerken zu messen. Solche Messungen wurden in der Vergangenheit an Leuchttürmen, Brückenpfeilern oder Ölplattformen durchgeführt [2]. Die Messapparatur besteht aus Lastpanelen, die am Bauwerk auf Höhe der Wasserlinie angebracht werden. Die wirkenden Kräfte können dabei zum Beispiel über Dehnungsmessstreifen gemessen werden. Um die Abhängigkeit der wirkenden Lasten von der Dicke des Eises sowie vom Versagensmechanismus darstellen zu können, wird der Messaufbau in der Regel durch weitere Vorrichtungen ergänzt. Die Eisdicke kann beispielsweise über verschiedene Abstandssensoren unter- bzw. oberhalb der Eisdecke ermittelt werden. Der Vorgang des Eisversagens wird mithilfe von Kameras aufgezeichnet [2].

Eine weitere Möglichkeit, um die wirkenden Kräfte zwischen Meereis und Gründungsstruktur zu ermitteln, ist die Modellierung in sogenannten Eistanks [14]. Der Vorteil von solchen Lastmodellierungen ist, dass exakte Fragestellungen genauer untersucht werden können. Die Modellstruktur wird dabei in einem bestimmten Verhältnis zur Original-

abmessung nachgebaut. Des Weiteren können die Eiseigenschaften und verschiedene geographischen Bedingungen mithilfe von Skalierungsfaktoren an das Modell angepasst werden [14]. Im Umkehrschluss können die Ergebnisse aus der Modellierung auf das Original übertragen werden. Einige solcher Ergebnisse werden in den Kapiteln 4.4.2 (vertikale Gründungsstrukturen) und 5.1.1 dargestellt.

Bei der Ermittlung von Eislasten für die Auslegung von OWEA wird aus Kostengründen grundsätzlich auf Berechnungsverfahren zurückgegriffen. Da viele der Eingangsparameter in der Praxis schwer zu bestimmen sind, werden in der Regel sehr konservative Eingangswerte angenommen, um ein ausreichend sicheres Ergebnis zu erhalten [5]. Existieren für das relevante Gebiet bereits Messergebnisse oder besteht die Möglichkeit Messungen an bereits bestehenden Bauwerken durchzuführen, sollten diese bei der Lastermittlung berücksichtigt werden. Eine Modellierung von speziellen Fragestellungen wird grundsätzlich dann vorgenommen, wenn es wenig bis gar keine Informationen über den zu untersuchenden Vorgang gibt. Ergebnisse aus Messungen oder Modellierungen können außerdem als Orientierungswerte für die berechneten Eislasten dienen [8].

4.2 Treibende Kräfte

Belastungen an Offshore – Gründungsstrukturen resultieren aus Bewegungen des Eises [15]. Dabei kann das Meereis auf unterschiedliche Art und Weise in Bewegung geraten. Zum einen kann es durch Wärmeausdehnung zu thermisch bedingten Bewegungen kommen. Zum anderen können Bewegungen durch die Widerstandskräfte von Wind und Strömung entstehen [15].

4.2.1 Bewegungen durch thermische Ausdehnung

Die Witterung beeinflusst die Temperatur des Eises. Dabei spielen Charakteristika wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung und Schneebedeckung eine erhebliche Rolle [5]. Kommt es zur Temperaturänderung, bildet sich im Bereich der Eisoberfläche eine von der Lufttemperatur abweichende Eistemperatur. Die Unterseite des Eises weist weiterhin Temperaturen nahe des Gefrierpunktes auf [5]. Das Temperaturprofil des Eises verändert sich dabei in Abhängigkeit von Einstrahlungsdauer und Sonneneinwirkung [5].

Durch die Veränderung der Eistemperatur kann es zur Ausdehnung oder zum Zusammenziehen der Eisfläche kommen. Die Größenordnung, mit der sich die Eisfläche ausdehnt oder zusammenzieht, kann über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α_{th}) beschrieben werden [5]. Für homogene Körper gilt:

$$\alpha_{th} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta \theta} \quad (4.1)$$

Da Meereis jedoch eine sehr komplexe Struktur mit mehreren unterschiedlichen Phasen aufweist, kann die Gleichung (4.1) nur bedingt für die Berechnung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Meereis verwendet werden. Bei exakten Berechnungen muss daher auch der Salzgehalt des Eises berücksichtigt werden [16].

4.2.2 Bewegungen durch Wind und Meeresströmungen

Durch die Widerstandskraft des Windes und der Meeresströmung wirken Kräfte auf Eisflächen, die das Eis in Bewegung versetzen. Kommt es zum Kontakt mit einer OWEA, kann es zur Übertragung der Kräfte auf die Anlage kommen. Die Größe der Belastung hängt dabei im Wesentlichen von der Eisfläche sowie der Beschaffenheit der Eisschicht ab [5].

Bei Eisschollen handelt es sich um vom Wasser und der Luft umströmte Körper. Die Widerstandskraft des Windes beschreibt die Kraft, die der Wind auf eine Eisfläche ausübt. Die Schubkraft des Windes (τ_{Wind}) lässt sich über die Dichte der Luft ($\rho_L = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei 0°C), den Widerstandsbeiwert (c_{Wind}) und die Windgeschwindigkeit 10 m über der Eisoberfläche (v_{Wind}) nach folgender Gleichung berechnen [15]:

$$\tau_{\text{Wind}} = 0,5 \cdot \rho_L \cdot c_{\text{Wind}} \cdot v_{\text{Wind}}^2 \quad (4.2)$$

Der Widerstandsbeiwert (c_{Wind}) ist abhängig von der Form sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Eises. Bei glattem Eis liegt der Wert bei 0,001, bei schneebedeckten Eisflächen bei 0,0015 und bei Packeis zwischen 0,002 und 0,005 [5]. Das Produkt aus Schubkraft und Eisschollenfläche (A_{Scholle}) beschreibt die Widerstandskraft des Windes [15].

$$F_{\text{Wind}} = \tau_{\text{Wind}} \cdot A_{\text{Scholle}} \quad (4.3)$$

Entsprechend der Gleichungen (4.2) und (4.3) wird die Widerstandskraft des Windes im Wesentlichen von der Windgeschwindigkeit und der Fläche der Eisscholle beeinflusst. Bei mittelgroßen bis großen Eisschollen reicht die Kraft des Windes aus, sodass es bei der Kollision mit einer OWEA zum Versagen des Eises kommt [15]. Die dabei auf das Bauwerk wirkende Maximallast hängt dann vom Versagensmechanismus ab. Unter bestimmten Bedingungen (kleinen Eisschollen), kann jedoch auch die Widerstandskraft des Windes zur maßgebenden Lastgröße werden. Wenn keine Strömungen vorherrschen, beträgt die Geschwindigkeit der Eisscholle nach einer Faustregel in etwa 3 % der Windgeschwindigkeit [15].

Neben der Kraft des Windes, muss in Meeren auch die Widerstandskraft der Strömung berücksichtigt werden. Die Widerstandskraft der Strömung (F_{Strom}) kann, ähnlich wie die des Windes, über die Fläche des Eises und die Schubkraft (τ_{Strom}) berechnet werden [15].

$$F_{\text{Strom}} = \tau_{\text{Strom}} \cdot A_{\text{Scholle}} \quad (4.4)$$

mit
$$\tau_{\text{Strom}} = 0,5 \cdot \rho_W \cdot c_{\text{Strom}} \cdot u^2 \quad (4.5)$$

Für die Dichte von Wasser (ρ_W) kann entweder ein Standardwert von $1028 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ oder ein für die Ostsee genauerer Wert von $1007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen werden [6]. Der Widerstandsbeiwert (c_{Strom}) ist eine Funktion der Rauigkeit und beträgt an der Unterseite des Eises 0,006 [15].

Lasten an OWEA können über die treibenden Kräfte ermittelt werden. Da einige Einflussparameter, wie zum Beispiel die Fläche der Eisscholle, jedoch recht schwierig zu ermitteln sind, erfolgt die Berechnung von maximalen Eislasten in der Regel über die Versagenslast [5]. Voraussetzung für diesen Berechnungsansatz ist, dass es zum Versagen des Eis am Bauwerk kommt.

4.3 Lastlimitierende Faktoren

Die Belastungen von Meereis auf Offshore – Gründungsstrukturen werden durch das Eisversagen am Bauwerk begrenzt. Dementsprechend kann die maximale Belastung über die auftretenden Versagensmechanismen beschrieben werden [5].

4.3.1 Versagensmechanismen

Beim Kontakt von maritimen Bauwerken mit Meereis kann es zu verschiedenen Versagensformen kommen. Die Art des Versagens hängt dabei im Wesentlichen von der Dicke und der Beschaffenheit des Eises, der Geschwindigkeit mit der das Eis auf ein Bauwerk trifft und von der Wasserliniengeometrie der Gründungsstruktur ab [17].

Um die verschiedenen Interaktionsmechanismen besser beurteilen zu können, wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Modell- und Feldversuchen durchgeführt. Da sich die Offshore – Windindustrie jedoch, gerade in arktischen Gebieten, noch in den Kinderschuhen befindet, gibt es hinsichtlich der Versagensmechanismen noch keine repräsentativen Untersuchungen an OWEA. Im Weiteren werden die unterschiedlichen Versagensmechanismen deshalb durch Beobachtungen am Leuchtturm „Norstömsgrund“ erläutert. Diese Beobachtungen wurden im Rahmen des von der EU unterstützten „STRICE – Projekt“ (Structures on Ice) durchgeführt [17].

Der Leuchtturm „Norstömsgrund“ liegt im nördlichen Bereich des Bottnischen Meerbusens und somit in einem Gebiet, in dem es häufig zur Bildung von Meereis kommt [17]. Die Gründungsstruktur besteht aus Beton und hat eine vertikale Form, wobei der Durchmesser im Bereich der Wasserlinie 7,2 m beträgt [17]. Die Gründungsstruktur kann somit durchaus mit der einer OWEA (Schwergewichtsrundung) verglichen werden. Insgesamt wurde die Eisinteraktion über einen Zeitraum von 2001 bis 2003 aufgenommen. Dabei wurde das Versagen des Eises durch Kameraaufzeichnungen dokumentiert.

Im Rahmen der Beobachtungen wurden folgende Versagensmechanismen festgestellt [17]:

- Versagen durch Biegung
- Versagen durch Druck
- Versagen durch Beulen
- Versagen durch Spaltbruch
- kombinierte Versagensformen

Die beiden erstgenannten Mechanismen stellen die am häufigsten auftretenden Versagensformen dar [17]. Im Weiteren wird deshalb ausschließlich das Versagen durch Druck und Biegung anhand der Forschungen am „Norstömsgrund“ Leuchtturm beschrieben.

Versagen durch Druck

Das Druckbruchversagen stellt bei vertikalen Bauwerken den am häufigsten auftretenden Versagensmechanismus dar. Bei der Interaktion zwischen Meereis und Bauwerk kommt es beim Druckbruch zu Überschreitungen der Druckfestigkeit des Eises. Das Eis wird dabei durch die treibenden Kräfte gegen die Struktur gedrückt, wodurch es zum Bruch des Eises kommt.

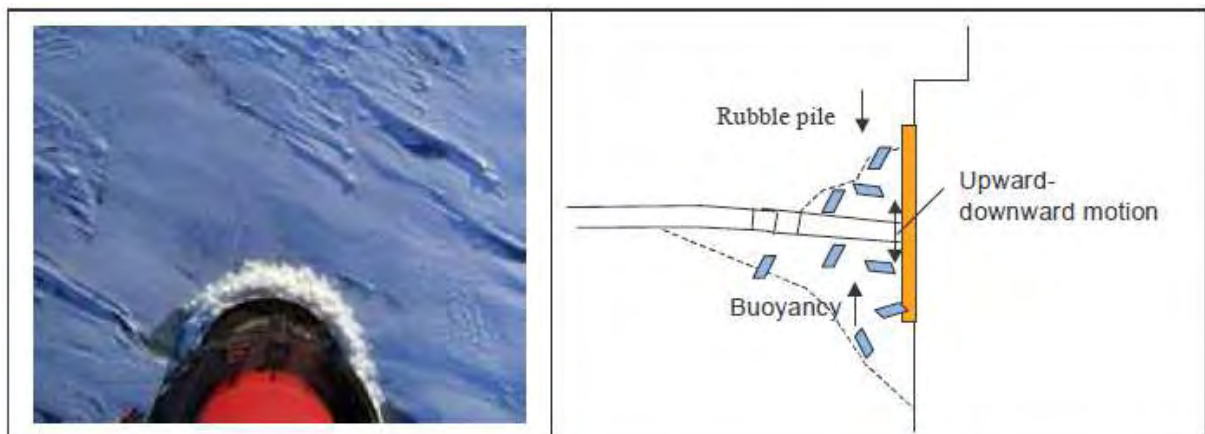


Abbildung 4-1: Druckbruchversagen am Leuchtturm „Norstömsgrund“ (links), schematische Darstellung des Druckbruchversagens (rechts) [17].

Die zerstückelten Eisfragmente lagern sich oberhalb und unterhalb der Eisdecke ab, wodurch es zu vertikalen Belastungen der Eisschicht kommt [17]. Nach unten gerichtete Kräfte resultieren aus der Erdanziehungskraft und Eisaufwürmungen oberhalb der Eisdecke. Nach oben gerichtete Kräfte entstehen durch Eisfragmente unterhalb der Eisdecke, die durch die Auftriebskraft des Wassers nach oben gedrückt werden (s. Abbildung 4-1, rechts). Im Bereich der Eiskante kommt es daraufhin zu Auf- und Abbewegungen des Eises, welche die Eiszerkleinerung weiter verstärken (s. Abbildung 4-1). Im Rahmen des „STRICE – Projektes“ konnte festgestellt werden, dass die Amplitude der vertikalen Bewegung bei einer Eisdicke von 30 cm in etwa 3 – 5 cm beträgt [17].

Bei der Interaktion von Meereis mit OWEA kann es im Zusammenhang mit Druckbruchversagen zu Überlagerungen zwischen der Bruchfrequenz des Eises und der Eigenfrequenz der Anlage kommen [1]. Die Eigenschwingung des Bauwerks beeinflusst dabei die Bruchfrequenz des Eises, sodass diese auf die natürliche Eigenfrequenz der Konstruktion abgestimmt wird (s. Kapitel 4.4.3) [1].

Versagen durch Biegung

Beim Versagen durch Biegung bricht das Eis infolge von Überschreitungen der Biegefestigkeit. Am häufigsten kommt es an geneigten Gründungsstrukturen zum Bruch durch Biegung. Wie die Beobachtungen am „Norstömsgrund“ Leuchtturm zeigen, kann es jedoch auch an vertikalen Gründungsstrukturen zum Biegebruch kommen [17].

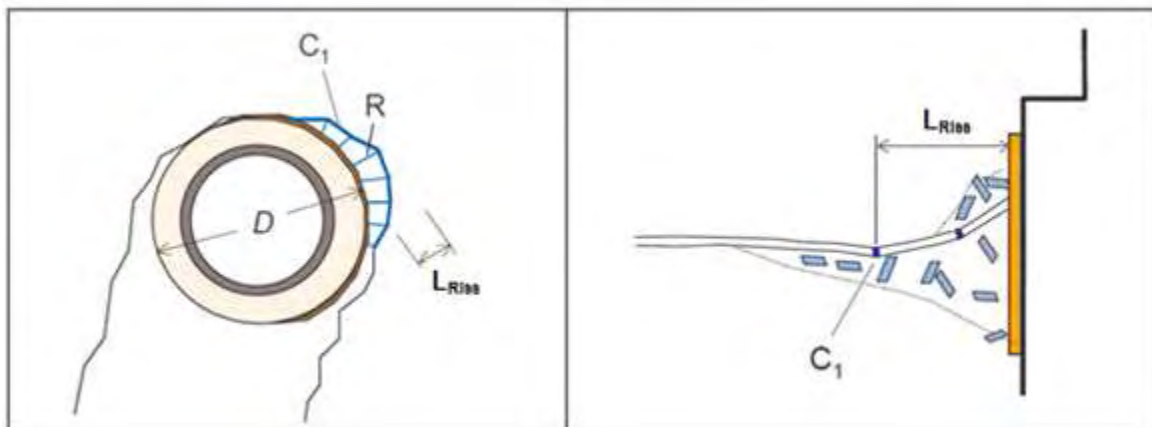


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der beim Biegebruch ablaufenden Vorgänge [17].

Bei der Interaktion zwischen Eisscholle und Bauwerk, kommt es im ersten Schritt zur Bildung eines parallel zur Gründungsstruktur verlaufenden Risses (C_1) (s. Abbildung 4-2). In welchem Abstand der Riss vom Bauwerk entfernt liegt, hängt von der Dicke des Eises sowie der Driftgeschwindigkeit ab. Im Rahmen der Untersuchungen konnte am Leuchtturm eine typische Risslänge (L_{Riss}) von 1 bis 2 m festgestellt werden. Im weiteren Biegeverlauf kommt es zur Ausbildung radialer Risse (R), wodurch die Eisschicht in unterschiedlich große Eisblöcke zerbricht (s. Abbildung 4-2) [17]. Je nach Bruchrichtung, kann es dabei zu Eisansammlungen unter – bzw. oberhalb der Eisdecke kommen, welche zu zusätzlichen Belastungen des Bauwerks führen können.

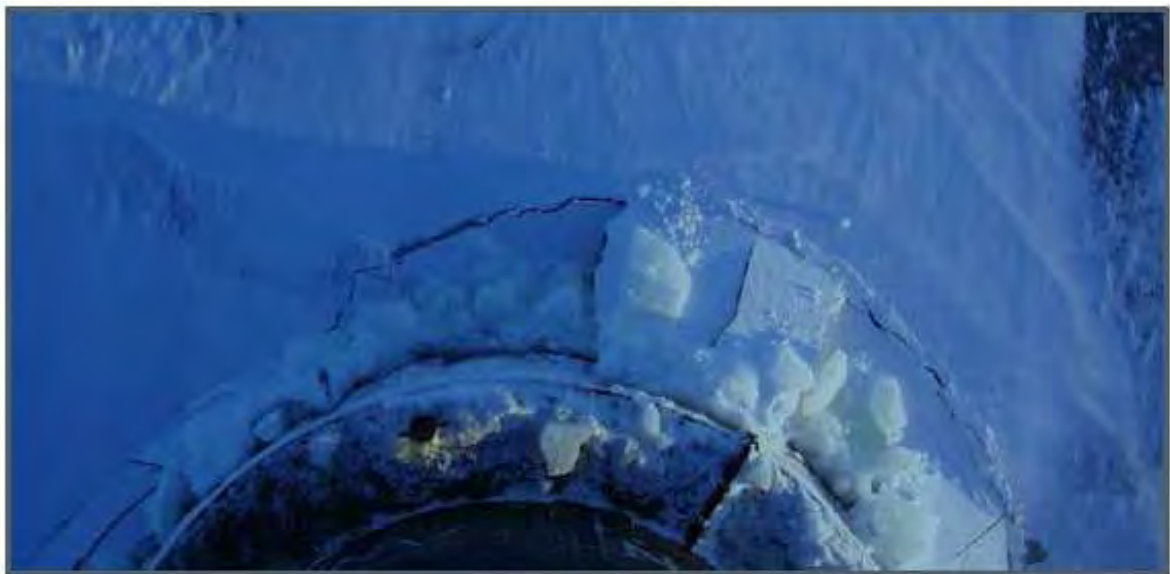


Abbildung 4-3: Versagen durch Biegung am Leuchtturm „Norstömsgrund“ [17].

In Abbildung 4-3 sind die typischen Charakteristika für einen Bruch durch Biegung am Beispiel des „Norstömsgrund“ Leuchtturms dargestellt. Der parallel zum Bauwerk verlaufenden Riss sowie die radialen Risse sind dabei deutlich sichtbar. Außerdem erkennt man, dass sich die Eisblöcke oberhalb der Eisdecke auftürmen und gegen den Leuchtturm drücken [17].

4.3.2 Festigkeiten

Druckfestigkeit

Die Dehnungsrate (ϵ) ist eine wichtige Kenngröße bei der Beschreibung der Druckfestigkeit (σ_c). Bis zu einer Dehnungsrate von etwa 10^{-3} s^{-1} kommt es zur plastischen Verformung des Eises (duktiles Verhalten) [5]. Treten größere Belastungen auf, versagt das Eis infolge von Rissbildung oder Druckbruchversagen [5].

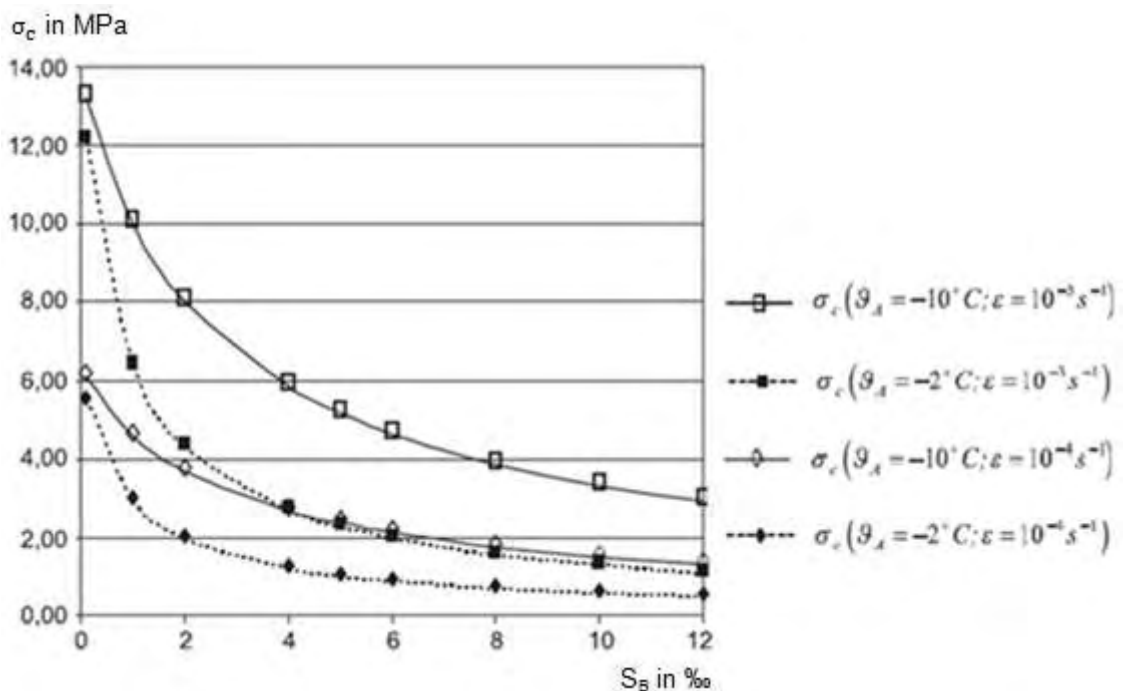


Abbildung 4-4: Druckfestigkeit von Meereis in Abhängigkeit vom Salzgehalt [6].

In Abbildung 4-4 wird die Druckfestigkeit exemplarisch für verschiedene Eistemperaturen und Dehnungsraten in Abhängigkeit vom Salzgehalt dargestellt. Die Druckfestigkeit nimmt mit steigendem Salzgehalt ab. Außerdem ist die Druckfestigkeit stark von der Temperatur des Eises abhängig. Dies hat zur Folge, dass die Druckfestigkeit bei niedrigen Temperaturen höhere Werte annimmt (s. Abbildung 4-4) [6].

Um die Druckfestigkeit von Meereis zu bestimmen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen kann die Druckfestigkeit über Würfeldruckversuche ermittelt werden [5]. Dabei wird das zu prüfende Eis zwischen zwei Druckplatten eingespannt und so lange belastet, bis es zum Bruch des Eises kommt. Zum anderen kann die Druckfestigkeit mithilfe von numerischen Verfahren berechnet werden. Die Berechnung kann beispielsweise über die Dehnungsrate (ϵ) und die Porosität (ϕ_B) erfolgen [6]. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei dem Berechnungsansatz, um ein Nährungsverfahren handelt.

$$\sigma_c = 2700 \cdot \epsilon^{\frac{1}{3}} \cdot \phi_B^{-1} \quad (4.6)$$

Die Druckfestigkeit stellt in der Regel die höchste Festigkeit von Meereis dar, sodass es beim Versagen infolge von Druckfestigkeitsüberschreitungen zu starken Belastungen an OWEA kommen kann [6].

Wiederholungsperiode in Jahren	Druckfestigkeit von Meereis σ_c in MPa	
	südliche Nordsee, Skagerrak, Katterak	südwestliche Ostsee
5	1,0	1,0
10	1,5	1,5
50	1,6	1,9
100	1,7	2,1

Tabelle 4-1: Beispiele für die Druckfestigkeit von Meereis in Abhängigkeit der Wiederholungsperiode [1].

Der Vergleich von Druckfestigkeiten in der südlichen Nord- und südwestlichen Ostsee zeigt, dass bis zu einer Wiederholungsperiode von 10 Jahren keine signifikanten Unterschiede auftreten (s. Tabelle 4-1) [1]. In selteneren Fällen, zum Beispiel bei einer Wiederholungsperiode von 50 Jahren, treten in der Ostsee jedoch höhere Werte auf. Die höhere Druckfestigkeit resultiert aus lang anhaltenden Phasen mit niedrigen Temperaturen. Dabei kommt es zur Reduzierung des Salzgehaltes, wobei die in den Kavernen eingeschlossene Salzsole aus dem Eis herausicksert (s. Kapitel 2.1.1). Im Bereich der nördlichen Ostsee nimmt die Druckfestigkeit aufgrund des geringeren Salzgehaltes signifikant zu. In extrem kalten Wintern können hier Druckfestigkeiten von bis zu 3 MPa auftreten [10].

Biegefestigkeit

Wie die Druckfestigkeit, kann auch die Biegefestigkeit mithilfe verschiedenster Verfahren ermittelt werden. Die Berechnung kann zum Beispiel über das Solevolumen (V_B) nach folgender Näherungsgleichung erfolgen [6]:

$$\sigma_f = 1,76 \cdot e^{-5,88 \cdot \sqrt{\frac{V_B}{1000}}} = 1,76 \cdot e^{-0,19 \cdot \sqrt{V_B}} \quad (4.7)$$

Sofern keine weiteren Eisfestigkeitsuntersuchungen vorliegen, kann die Biegefestigkeit auch in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit bestimmt werden. Verschiedene Literaturquellen geben hier eine Spannweite von $0,33 \cdot \sigma_c$ bis $0,4 \cdot \sigma_c$ an [5].

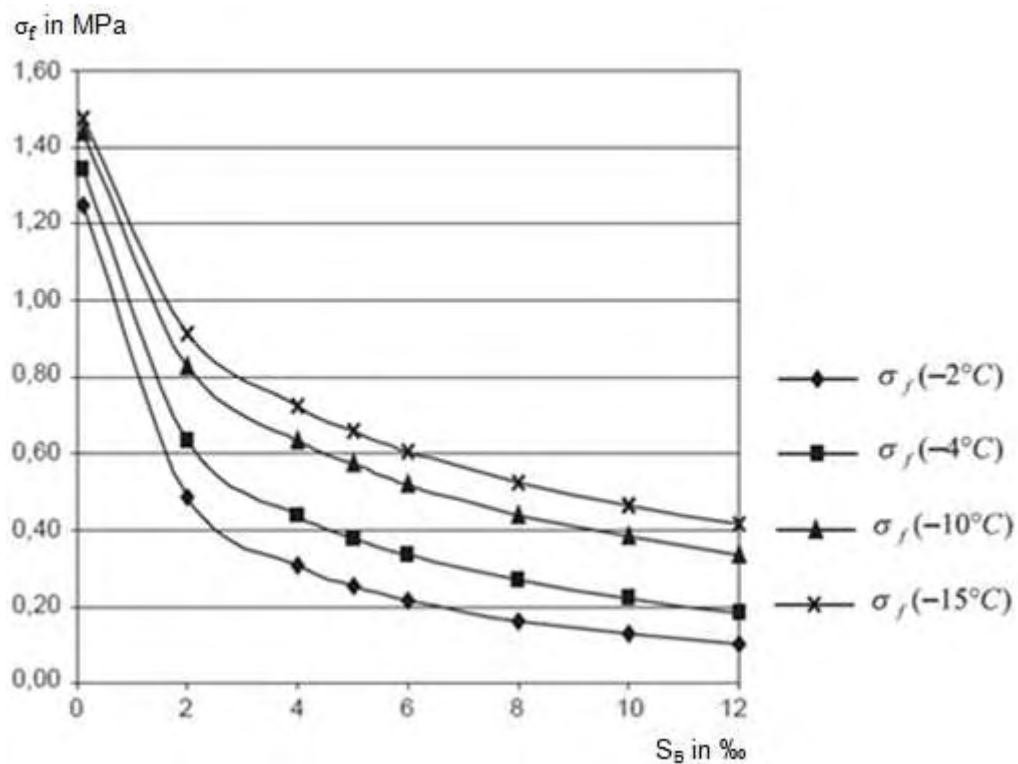


Abbildung 4-5: Biegefestigkeit von Meereis in Abhängigkeit vom Salzgehalt [6].

Die Biegefestigkeit von Eis ist von der Temperatur des Eises sowie vom Salzgehalt abhängig [5]. Maximale Werte treten bei geringen Salzgehalten und hohen Minustemperaturen auf (s. Abbildung 4-5).

Im südwestlichen Bereich der Ostsee kann es während der 20 jährigen Lebensdauer einer OWEA zur Bildung von Meereis mit Biegefestigkeiten von 0,39 MPa bis 0,5 MPa kommen [1]. Dementsprechend ist die Druckfestigkeit von Meereis in diesem Gebiet in etwa 4-mal so groß wie die Biegefestigkeit.

Die unterschiedlichen Festigkeiten spielen bei Überlegungen zur Reduzierung von Eislasten eine entscheidende Rolle. Es kann beispielsweise zum Einsatz von geneigten Oberflächen auf Höhe der Wasserlinie kommen. Dabei sorgt die schräge Struktur dafür, dass das Eis infolge von Überschreitungen der Biegefestigkeit bricht (s. Kapitel 5.1).

4.4 Belastungsformen

4.4.1 Thermischer Eisdruck

Thermischer Eisdruck ist eine Form der statischen Belastung und wird durch thermisch bedingte Bewegungen bei zeitgleicher Dehnungsbehinderung hervorgerufen [5]. Die Bewegungen resultieren dabei aus Veränderungen der Eistemperatur, wobei es zur Ausdehnung oder zum Zusammenziehen des Eises kommen kann (s. Kapitel 4.2.1).

Da die Eigenschaften von Meereis ein gutes Relaxationsvermögen ermöglichen, können langsam auftretende Temperaturänderungen relativ gut vom Eis kompensiert werden [5]. Kommt es jedoch zu schnellen Temperaturänderungen, kann es zu erheblichen Spannungen in der Eisdecke kommen. Bei plötzlicher Temperaturverringerung versagt das Eis infolge von Rissbildung. Dabei zieht sich das Eis zusammen und es kommt zur Wölbung der Eisdecke [5]. Durch das Eigengewicht des Eises entstehen Biegerisse woraufhin sich das Eis entspannt. Im Gegensatz dazu, dehnt sich das Meereis bei schnellen Temperaturerhöhungen aus, sodass die Eisdecke Druck auf angrenzende Berandungen ausübt.

Die Größe des sich ausbildenden Eisdrucks hängt dabei im Wesentlichen von folgenden Parametern ab [5]:

- der Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Eis
- dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten
- den mechanischen Eigenschaften des Eises
- der Dicke des Eises
- dem Einspannungsgrad der Eisdecke z.B. zwischen zwei OWEA

Treten zu hohe Belastungen auf, versagt das Eis infolge von Überschreitungen der Druck- oder Biegefestigkeit [5]. Die maximal wirkende Belastung auf angrenzende Bauwerke, wird dementsprechend durch die Festigkeitseigenschaften des Eises begrenzt (s. Kapitel 4.3.2) [5].

Belastungen durch thermischen Druck können mithilfe numerischer Verfahren berechnet werden. Die Berechnung kann zum Beispiel über die Ausgangstemperatur des Eises (ϑ_0) sowie die Geschwindigkeit der Temperaturänderung ($\dot{\vartheta}$) erfolgen [5]:

$$p_{th} = 0,031 \cdot \frac{(|\vartheta_0|+1)^{\frac{5}{3}}}{|\vartheta_0|^{0,88}} \cdot (0,35 \cdot \dot{\vartheta})^{0,33} \quad (4.8)$$

Die genaue Berechnung des Eisdrucks stellt sich ohne Vergleichswerte aus geographisch – klimatisch ähnlichen Gebieten jedoch als äußerst schwierig dar. Grund dafür ist die Tatsache, dass Eingangsparameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung und Schneebedeckung oftmals geschätzt werden müssen, wodurch hohe Unsicherheiten auftreten [5]. Nur in den seltensten Fällen sind genaue Informationen über die relevanten Parameter vorhanden, sodass die meisten Berechnungsergebnisse kritisch zu hinterfragen sind. Berechnungen sollten daher stets mit den jeweils konservativsten Ausgangsdaten durchgeführt werden [5].

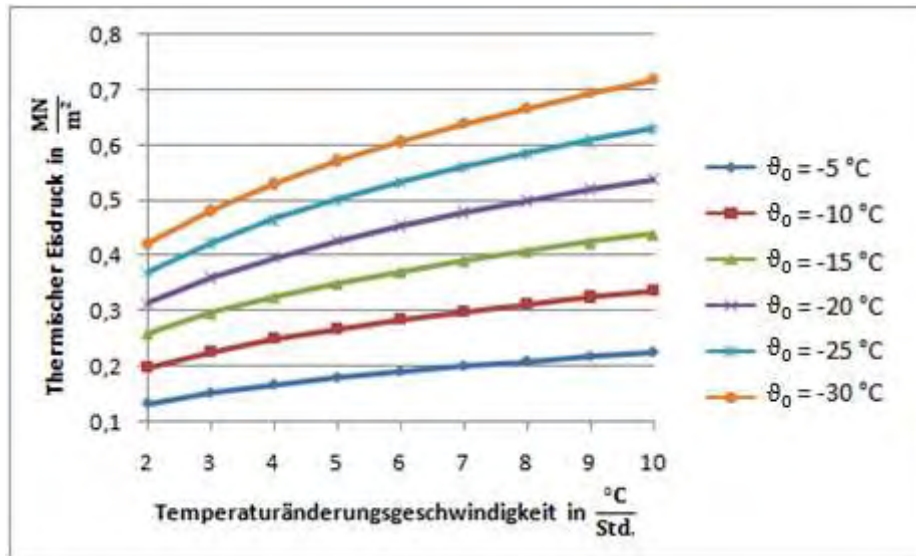


Abbildung 4-6: Thermischer Eisdruck nach Gleichung (4.8).

In Abbildung 4-6 ist der thermische Eisdruck für verschiedene Ausgangstemperaturen im Bereich von -5°C bis -30°C in Abhängigkeit von der Temperaturänderungsgeschwindigkeit dargestellt [5]. Die Werte wurden dabei über die Gleichung (4.8) berechnet. Bei einer Ausgangstemperatur von -30°C steigt der thermische Druck mit zunehmender Temperaturänderungsgeschwindigkeit kontinuierlich auf ca. $0,7 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$ an. Ebenfalls wird deutlich, dass der thermische Druck bei tiefen Ausgangstemperaturen hohe Werte annimmt (s. Abbildung 4-6) [5].

Untersuchungen in Kanada und Russland haben ergeben, dass es bei Salzgehalten (S_B) von mehr als 1 ‰ (fast überall der Fall) und Eistemperaturen über -7°C zu minimalen Erhöhungen des thermischen Eisdrucks kommt, sodass dieser nicht weiter berücksichtigt werden müssen (14). In der südwestlichen Ostsee muss daher aufgrund relativ hoher Salzgehalte nur in den seltensten Fällen mit Belastungen durch thermischen Eisdruck gerechnet werden [8].

Innerhalb eines OWP kann es zwischen eingefrorenen OWEA oder zwischen Anlagen und der Küste zu thermisch bedingten Spannungen im Eis kommen [8]. Da OWP generell etwas von der Küste entfernt errichtet werden, tritt der Spannungsfall zwischen Küste und OWEA eher selten auf. Kommt es innerhalb eines OWP zur Ausbildung einer flächendeckenden Eisschicht, wirken die Anlagen selbst als Dehnungsbehinderung. Dadurch kann es infolge von schnellen Temperaturänderungen zu Spannungen zwischen

den Anlagen kommen [8]. Die größten Lasten wirken dabei auf alleinstehende und sich im Randbereich eines OWP befindende Anlagen [1].

4.4.2 Belastungen durch Treibeis

Zu Belastungen an Gründungsstrukturen von OWEA durch Treibeis kommt es, wenn das Eis durch die Kräfte von Wind und Strömung gegen die Anlage gedrückt wird. In der Regel reichen die wirkenden Kräfte aus, sodass es zum Versagen des Eises am Bauwerk kommt. Dabei kann es je nach Versagensmechanismus zu statischen und dynamischen Belastungen kommen [12]. Dynamische Lasten treten zum Beispiel auf, wenn das Eis an der Struktur infolge von Druckfestigkeitsüberschreitungen zerbricht. Der Vorgang wird in Kapitel 4.4.3 genauer beschrieben.

Vertikale Gründungsstrukturen

Bei der Kollision von Treibeis mit vertikalen Gründungsstrukturen wie Monopiles oder Schwergewichtsfundamenten kann es zu verschiedenen Versagensformen wie Druckbruch, Spaltbruch, Beulen oder Biegung kommen [5]. Dabei wirken horizontale Kräfte, die bei der Auslegung von OWEA berücksichtigt werden müssen. Im Weiteren werden die wirkenden Lasten am Beispiel des Druckbruchversagens erläutert.

Der Druckbruch stellt die am häufigsten auftretende Versagensform an vertikalen Gründungsstrukturen dar. Dabei kann die Ausbreitung des Eisdrucks beim Auftreffen der Eisscholle in verschiedene Phasen unterteilt werden [5].

- Phase 1 Bei der Interaktion einer Eisscholle mit einem Gründungspfahl kommt es zum Einschnitt des Eises. Der Eisdruck steigt dabei innerhalb von einer Sekunde an.
- Phase 2 Es folgt die Schnittphase. Dabei schwanken die Belastungen an den Berührungspunkten zwischen Eis und Bauwerk innerhalb von hundertstel Sekunden. Dieser Vorgang hält so lange an bis die Treibgeschwindigkeit geringer als $5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ ist. Die Schnittphase ist beendet, wenn das Treibeis unmittelbar vor dem Stillstand steht.

- Phase 3 Diese Phase wird als Schubphase bezeichnet. Dabei kann es durch die geringe Verformungsgeschwindigkeit zur plastischen Verformung des Eises kommen.
- Phase 4 In dieser Phase kommt es zum kurzzeitigen Stillstand des Eises am Bauwerk. Der dynamische Druck ist dabei größer als der statische.

Der gesamte Vorgang dauert nur wenige Sekunden und endet mit dem Bruch des Eises. Im weiteren Interaktionsverlauf kann es zur kontinuierlichen Eiszerkleinerung am Bauwerk kommen. Dabei kommt es in periodischen Abständen zum Wechsel zwischen Druckanstieg und Bruch [12]. Dieser dynamische Prozess wird in Kapitel 4.4.3 detaillierter erläutert. Die beim Bruch des Eises wirkende statische Maximallast kann nach folgender Gleichung berechnet werden [10]:

$$F_{h,\max} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D \cdot h \cdot \sigma_c \quad (4.10)$$

Die Geometrie der Gründungsstruktur auf Höhe der Wasserlinie wird durch den Formfaktor (k_1) beschrieben. Für OWEA wird in der Regel ein Wert von 0,9 angenommen [10]. Durch den Faktor (k_2) wird der Kontakt zwischen Bauwerk und Eis beschrieben. Da das Meereis beim Erstkontakt zwischen Eisscholle und Gründungsstruktur nicht vollständig an der Anlage anliegt, wird ein Faktor von 0,5 angenommen. Bei vollem Kontakt zwischen Eisscholle und Struktur gilt ein Wert von 1,0. [10]. Der dritte Faktor (k_3) beschreibt die Abhängigkeit der Eislast vom Verhältnis der Eisdicke zum Durchmesser des Bauwerks [10]. Es gilt:

$$k_3 = \sqrt{1 + \frac{5 \cdot h}{D}}$$

Ein weiterer, für die Auslegung von OWEA, wichtiger Bemessungsparameter ist die globale Eislast (F_{global}). Beim Druckbruchversagen kann die Berechnung der wirkenden Lasten über das Produkt aus globalem Eisdruck (p_{global}) und Kontaktfläche zwischen Gründungsstruktur und Eisschicht ($h \cdot D$) erfolgen [18].

$$F_{\text{global}} = p_{\text{global}} \cdot h \cdot D \quad (4.11)$$

mit

$$p_{\text{global}} = c_R \cdot \left(\frac{h}{1,0 \text{ m}} \right)^n \cdot \left(\frac{D}{h} \right)^{-0,16} \quad (4.12)$$

Der Festigkeitsbeiwert (c_R) beschreibt die Festigkeitseigenschaften unter Berücksichtigung von Referenzwerten für eine bestimmte Region. In der Ostsee kann dabei ein Wert von $c_R = 1,8 \text{ MPa}$ angenommen werden [18]. Für Eisdicken unter einem Meter kann der Koeffizient n über $-0,50 + \frac{h}{5}$ berechnet werden. Für Eisdicken größer als einen Meter gilt $n = -0,30$ [18].

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, können Eislasten auch auf anderem Wege ermittelt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes, in dem es um die Auswirkungen von Treibeis auf OWEA im Bereich der dänischen Ostsee ging, wurden die auf geneigte und vertikale Gründungsstrukturen wirkenden Eislasten untersucht und bewertet [14]. Die Eislasten wurden durch physische Modelltests im Verhältnis 1:26 im Eistank des National Research Council (NRC) in Kanada simuliert. Das Modell wurde dabei so angepasst, dass die Eigenschaften des Eises sowie weitere ortsgebundene Parameter, mit denen im Bereich der dänischen Ostsee vergleichbar sind.

Im relevanten Gebiet beträgt die maximale Druckfestigkeit für eine Wiederholungsperiode von 50 Jahren in etwa $1,9 \text{ MPa}$. Die maximale Biegefestigkeit liegt in der Regel bei einem Wert von $0,5 \text{ MPa}$ und die maximale Dicke des Eises beträgt in einem Zeitraum von 50 Jahren $0,57 \text{ m}$ [19]. Des Weiteren wurde bei Tests an den OWP „Middelgrunden“ und „Nysted – Rødsand“ festgestellt, dass die maximale Treibgeschwindigkeit des Eises $1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt und hauptsächlich von der vorherrschenden Strömung abhängt [19].

Bei den geneigten Strukturen erfolgte die Eislastensimulation an zwei Modellen mit unterschiedlichem Neigungswinkel (s. Kapitel 5.1). Die weiteren Tests wurden an einer vertikalen Struktur, die einen Monopile mit einem Durchmesser von 5 m repräsentiert, durchgeführt [19].

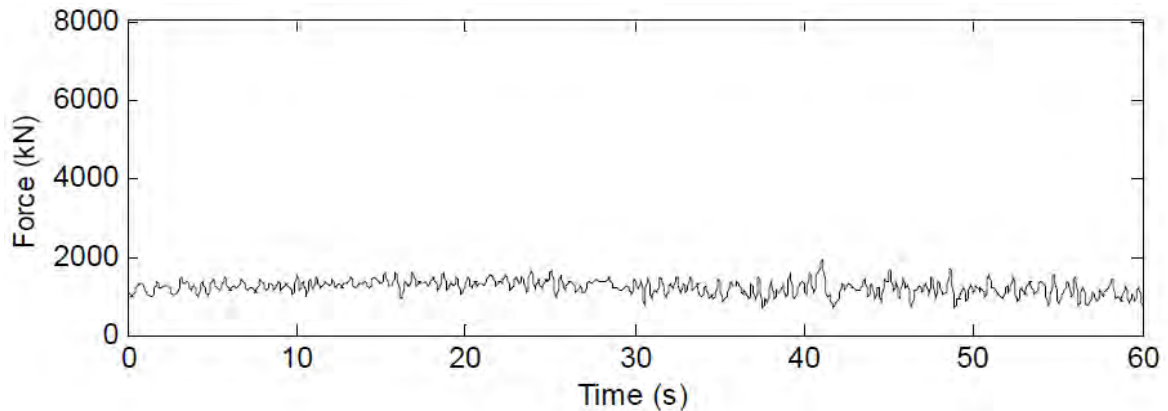


Abbildung 4-7: Lastprofil an einem Monopile mit 5 m Durchmesser beim Versagen durch Druck [19].

In 50 % der Fälle versagte das Eis an der vertikalen Gründungsstruktur durch Überschreitung der Druckfestigkeit. In den anderen 50 % traten verschiedene kombinierte Versagensformen auf [19]. Die Abbildung 4-7 zeigt ein typisches Lastprofil beim Versagen durch Druck [19]. Das abgebildete Kräftespektrum wurde im Rahmen der Testreihen ermittelt und dann mithilfe von Skalierungsfaktoren auf das Original übertragen. Unter den beschriebenen Standortbedingungen wurde dabei eine maximale Eislast von 2000 kN gemessen. Des Weiteren konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Treibgeschwindigkeit und maximaler Eislast festgestellt werden [19].

Beispiel:

Um die Genauigkeit von Lastberechnungen zu überprüfen wird im Folgenden die Gleichung (4.10) unter Verwendung der im Modell genannten Parameter exemplarisch angewandt und mit den Ergebnissen aus der Modellierung verglichen.

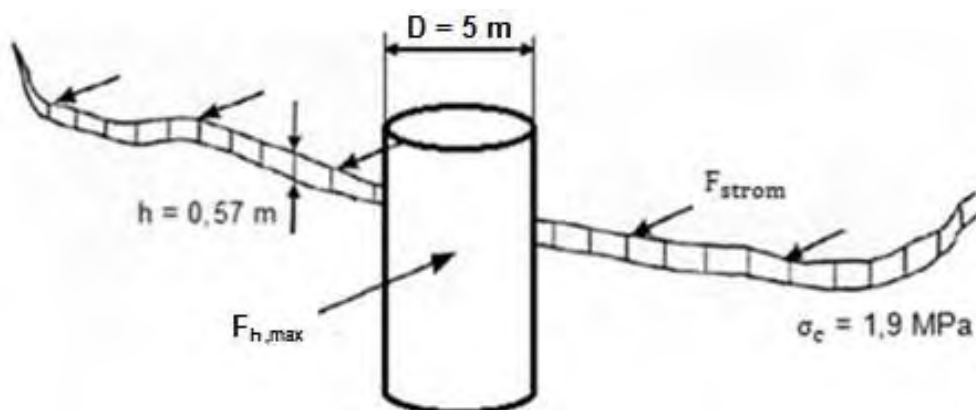


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der im Berechnungsbeispiel wirkenden Kräfte.

Die maximale Druckfestigkeit, die Dicke des Eises und der Durchmesser des Monopiles entsprechen den bei der Modellierung verwendeten Angaben (s. Abbildung 4-8). Da es sich bei einem Monopile um eine runde Struktur handelt, wird der Formfaktor mit 0,9 angenommen. Außerdem liegt die Eisscholle an der Gründungsstruktur an und wird durch die Kraft der Strömung gegen die Anlage gedrückt. Das Eis versagt dabei durch Überschreitungen der Druckfestigkeit und steht in vollem Kontakt mit der Struktur.

geg:	$D = 5 \text{ m}$
	$h = 0,57 \text{ m}$
	$\sigma_c = 1,9 \text{ MPa}$
	$k_1 = 0,9$
	$k_2 = 1,0$
	$k_3 = \sqrt{1 + \frac{5 \cdot 0,57 \text{ m}}{5,0 \text{ m}}} = \underline{1,25}$
ges:	$F_{H,\max} = ?$
Lösung:	$F_{h,\max} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D \cdot h \cdot \sigma_c$
	$F_{h,\max} = 0,9 \cdot 1,0 \cdot 1,25 \cdot 5,0 \text{ m} \cdot 0,57 \text{ m} \cdot 1,9 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$
	$F_{h,\max} = \underline{6,09 \text{ MN}}$

Tabelle 4-2: Berechnung der maximalen statischen Eislast nach Gleichung (4.10)

Bei der Lastsimulation im Eistank wurden maximale Eislasten von 2 MN gemessen [19]. Die unter den gleichen Bedingungen berechnete Eislast beträgt 6,09 MN (s. Tabelle 4-2). Der Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen kann verschiedene Gründe haben. Zum einen haben die Modelltests gezeigt, dass die Eislasten von der Treibgeschwindigkeit des Eises abhängen. In Gleichung (4.10) bleibt diese jedoch unberücksichtigt, was zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Zum anderen sind viele der gängigen Berechnungsansätze als konservativ zu betrachten, wodurch ebenfalls Unterschiede auftreten können [20].

Der Vergleich bestätigt Aussagen aus der Literatur, dass die Ergebnisse aus Berechnungen generell höher ausfallen als die tatsächlichen Werte [20]. Demzufolge entsprechen die Ergebnisse aus der Modellierung eher der Realität als die aus der Lastberechnung.

Geneigte Gründungsstrukturen

Bei Belastungen an geneigten Konstruktionen stellt das Biegeversagen den maßgebenden Belastungsfall dar. Generell sind die Belastungen dabei quantitativ geringer einzuschätzen als beim Druckbruchversagen [5]. Grund dafür ist die im Vergleich zur Druckfestigkeit niedrige Biegefestigkeit (s. Kapitel 4.3.2).

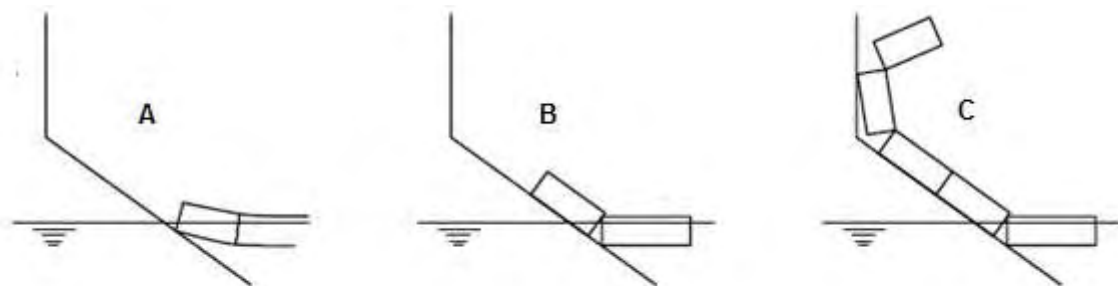


Abbildung 4-9: A: Kontakt zwischen Struktur und Eis. B: Versagen des Eises infolge von Biegung. C: Auftürmen von Eisblöcken an der Struktur [18].

Trifft eine Eisscholle auf eine geneigte Gründungsstruktur, kommt es beim Aufprall zur Biegung des Eises (s. Abbildung 4-9, A) [18]. Dabei kann es infolge von Überschreitungen der Biegefestigkeit zum Bruch des Eises kommen (s. Abbildung 4-9, B). Die gebrochenen Eisstücke lagern sich dabei je nach Neigungsrichtung oberhalb bzw. unterhalb der Eisdecke ab (s. Abbildung 4-9, C) [18].

Die bei der Eisinteraktion wirkenden Maximallasten können über die Festigkeits-eigenschaften des Eises, die Eisdicke, den Neigungswinkel auf Höhe der Wasserlinie, den Reibungskoeffizienten und durch das Vorkommen von Eisauftürmungen beschrieben werden. Die für den Bruch des Eises verantwortlichen Kräfte lassen sich am einfachsten anhand eines 2-dimensionalen Modells für breite Bauwerke erläutern [5]. Die durch Eisauftürmungen verursachten Kräfte bleiben dabei unberücksichtigt.

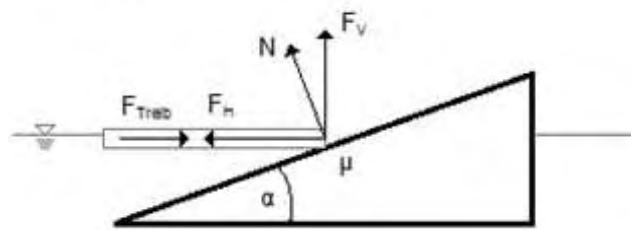


Abbildung 4-10: Vereinfachte Darstellung der beim Aufprall auf ein geneigtes Bauwerk wirkenden Kräfte.

Beim Auftreffen der Eisscholle kommt es bei nach oben geneigten Bauwerken zur Kraftübertragung an der Eisunterseite (s. Abbildung 4-10). Oftmals folgt dem Auftreffen die Zersplitterung/Deformierung der Eiskante [5]. Die horizontale Kraft wirkt in entgegengesetzter Richtung zur treibenden Kraft in der Mitte der Eisdecke. Die für das Biegeversagen verantwortliche Eckbelastung wird dabei durch die vertikale Kraftkomponente beschrieben [5]. Die vereinfachte Berechnung der wirkenden Kräfte kann über die Normalkraft (N), den Neigungswinkel (α) und den Reibungskoeffizienten (μ) erfolgen [5]:

$$F_h = N \cdot \sin \alpha + \mu \cdot N \cdot \cos \alpha \quad (4.12)$$

$$F_v = N \cdot \cos \alpha + \mu \cdot N \cdot \sin \alpha \quad (4.13)$$

Geneigte Konstruktionen kommen bei OWEA in Form von sogenannten „Ice – Cones“ zum Einsatz (s. Kapitel 5.1). Für „Ice – Cones“ mit einem Winkel zwischen 0 und 70 Grad kann die beim Biegeversagen wirkende statische Maximallast mithilfe der RALSTON – Gleichung berechnet werden [10].

Horizontaler Kraftanteil bei einem nach oben gerichteten Konus:

$$F_{h,Ral} = A_4 \cdot [A_1 \cdot \sigma_f \cdot h^2 + A_2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot h \cdot D^2 + A_3 \cdot \rho_w \cdot g \cdot h \cdot (D^2 - D_T^2)] \quad (4.14)$$

Vertikaler Kraftanteil bei einem nach oben gerichteten Konus:

$$F_{v,Ral} = B_1 \cdot F_{h,Ral} + B_2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot h \cdot (D^2 - D_T^2) \quad (4.15)$$

Für die Berechnung von nach unten geneigten Strukturen wird ρ_w durch $\frac{\rho_w}{9}$ ersetzt [10].

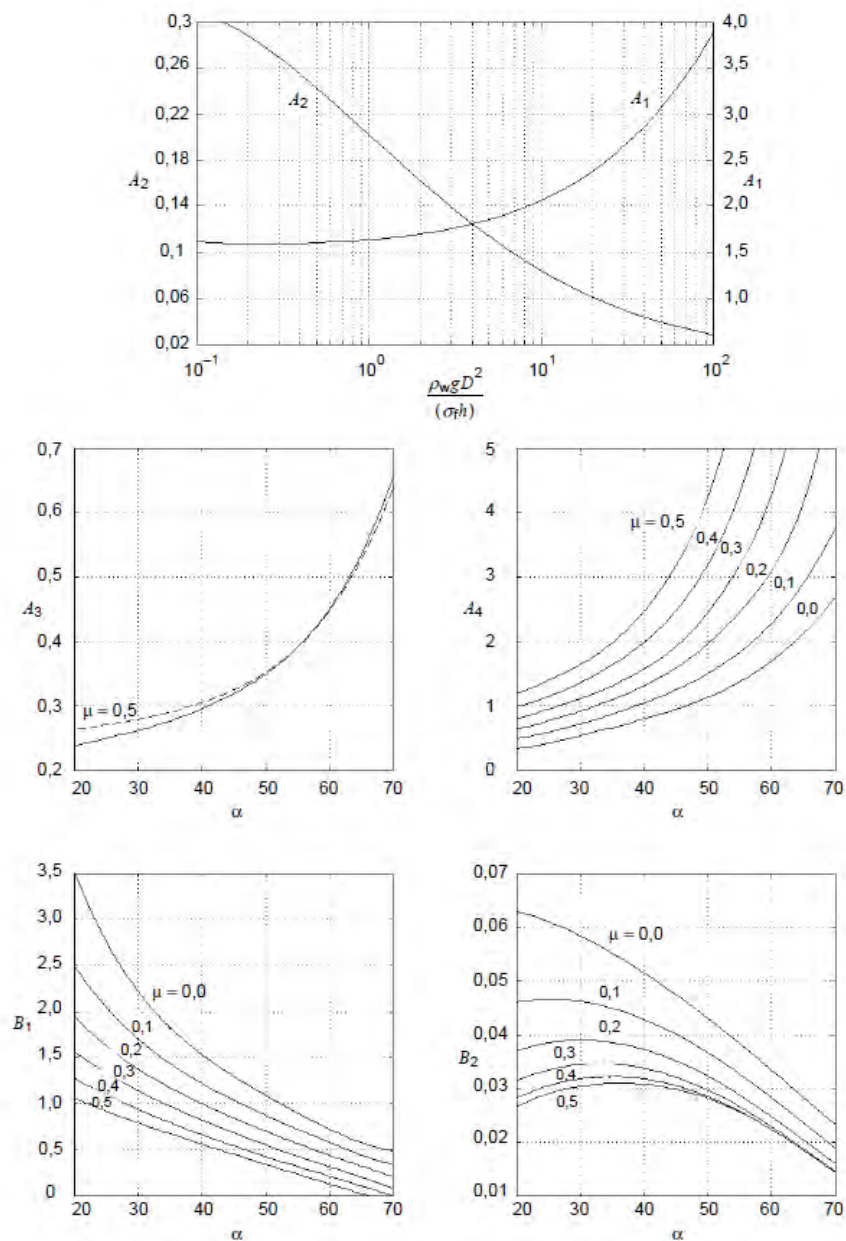


Abbildung 4-11: Koeffizienten für die Berechnung von Eislasten an konischen Strukturen [10].

In dem von RALSTON beschriebenen Berechnungsansatz werden verschiedene Parameter wie der Durchmesser am Ansatz des Konus (D_T), der Konusdurchmesser auf Höhe der Wasserlinie (D), die Dicke (h) und die Biegefestigkeit (σ_f) des Eises sowie verschiedene, vom Reibungskoeffizienten (μ) und Neigungswinkel (α) abhängige, Beiwerte (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , B_1 , B_2) berücksichtigt (s. Abbildung 4-11) [10]. Bei der Lastberechnung nach diesem Ansatz ist zu beachten, dass nur die beim Biegeversagen wirkenden Kräfte miteinbezogen werden.

In der Praxis müssen bei der Auslegung von geneigten Gründungsstrukturen weitere Krafteinwirkungen berücksichtigt werden. Zusätzliche Belastungen treten zum Beispiel durch Presseisrücken auf.

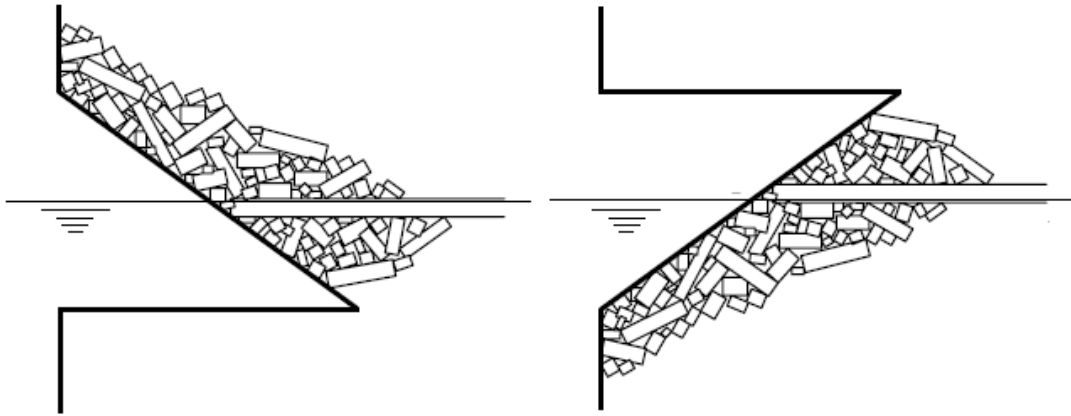


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung von Presseisrücken an einem nach oben (links) bzw. nach unten (rechts) geneigten Konus.

Je nachdem ob ein Konus nach oben oder nach unten gerichtet ist, kann es durch die zerbrochenen Eisstücke oberhalb bzw. unterhalb der Eisdecke zu Auftürmungen kommen (s. Abbildung 4-12). An einem Konus, dessen unterer Durchmesser größer als der obere Durchmesser ist, können sich in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Bauwerksbreite große Presseisrücken ausbilden [18]. Die Ausbreitung an OWEA ist durch die relativ geringe Bauwerksbreite begrenzt. Ab einer gewissen Größe türmt sich das Eis dann nicht mehr vor der Anlage auf, sondern fällt links und rechts vorbei. Bei nach unten geneigten Strukturen sind die durch Presseisrücken wirkenden Belastungen in der Regel geringer einzustufen. Grund hierfür ist zum einen der leichtere Abtransport von Eisteilen durch die Strömung [12]. Zum anderen kann es an einem nach oben geneigten Konus zum Zusammenfrieren von Eisteilen kommen, wodurch es zu größeren Belastungen bei der Eisräumung kommt [12].

Ein weiterer Punkt, der beim Auftreten von Presseisrücken berücksichtigt werden sollte, ist, dass die Funktion des Konus durch den Aufstau von Eisteilen beeinflusst werden kann. Im Extremfall können aufgestaute Eisstücke zur Veränderung der Versagensform führen. Das Eis versagt dann nicht mehr infolge der gewünschten Biegung, sondern bricht an den Eisteilen durch Überschreitung seiner Druckfestigkeit oder andere Versagensformen [18].

Um Belastungen durch Meereis so gering wie möglich zu halten, wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Tests an geneigten Gründungsstrukturen durchgeführt. In Kapitel 5.1 werden einige in Bezug auf OWEA relevante Empfehlungen zur Abmessung und Form von „Ice – Cones“ genannt.

4.4.3 Dynamische Eislasten

Windkraftanlagen stellen durch ihre Bauform schwingungsfreudige Gebilde dar. Das Schwingungsverhalten ist im großen Maß von den verschiedenen Lasten abhängig und hat einen großen Einfluss auf die innere Beanspruchung und die daraus resultierende Tragfähigkeit, Betriebsfestigkeit und Lebensdauer der Anlage [21]. Die Beanspruchung von Offshore – Gründungsstrukturen durch dynamische Lasten ist dabei in der Regel weitaus größer als die durch statische Lasten [12].

Zu dynamischen Effekten zwischen Meereis und Offshore – Gründungsstruktur kommt es, wenn das Eis kontinuierlich an der Struktur versagt. Dabei kann es sowohl an vertikalen als auch an geneigten Strukturen zu dynamischen Lasten kommen. Typischerweise treten diese Effekte bei sehr langsamer Eisbewegung im Geschwindigkeitsbereich von 0,04 bis $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf [18]. Die Interaktion kann dabei in unterschiedliche Phasen unterteilt werden. In der Belastungsphase kommt es an der Eiskante zur duktilen Verformung des Eises woraufhin die Belastung der Anlage allmählich zunimmt. Ist die maximale Festigkeit des Eises erreicht, bricht das Eis und die Belastung nimmt abrupt ab [18]. Im weiteren Belastungsverlauf kann es zur periodischen Wiederholung des beschriebenen Vorgangs kommen, wobei die Bruchfrequenz des Eises auf die natürliche Eigenfrequenz der Anlage abgestimmt wird. Dieser Effekt wird als „lock – in“ bezeichnet und beinhaltet, dass die Konstruktion durch Eisvibrationen in ihrer Eigenschwingungsform angeregt wird [1]. Versuche haben gezeigt, dass es an Strukturen mit einer Eigenschwingung von 0,4 bis 10 Hz zu den genannten Effekten kommen kann [18]. Ob eine solche Abstimmung auftritt, kann über die Treibgeschwindigkeit des Eises (v_{Eis}), die Eigenfrequenz der OWEA (f_n) und die Eisdicke ermittelt werden [1]:

$$\frac{v_{\text{Eis}} \cdot f_n}{h} > 0,3 \quad (4.16)$$

Bei der Auslegung der Anlage sollten alle Frequenzen miteinbezogen werden, die das Abstimmungskriterium erfüllen [1]. Unter Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften sollte die Konstruktion daher so entworfen werden, dass sie den auftretenden Lasten im Falle einer Frequenzabstimmung widersteht [1].

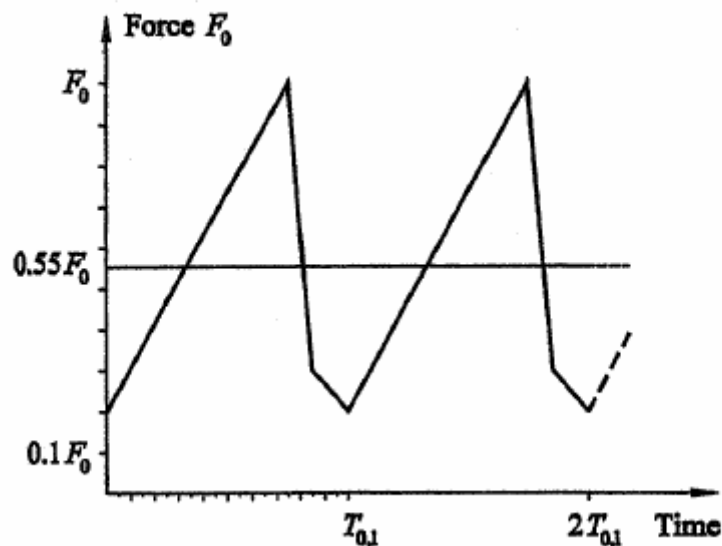


Abbildung 4-13 Gezacktes Lastprofil einer dynamischen Eisbelastung [1].

In der Regel kann das dynamische Lastprofil von vertikalen Gründungsstrukturen als Sägezahnfunktion dargestellt werden (s. Abbildung 4-13). Die maximale Belastung ist dabei mit der maximalen statischen Eislast gleichzusetzen [1]. Unterschiedliche Tests haben gezeigt, dass die Belastung während der Entspannungsphase nicht komplett zurückgeht, sondern auf einem Level von ca. 20 % der Lastspitze verweilt (s. Abbildung 4-13) [1].

Bei geneigten Strukturen resultieren die Vibrationen aus dem Scherversagen der Eisplatte [12]. Dabei sollte die Bruchfrequenz des Eises unabhängig von der Eigenfrequenz der OWEA angenommen werden. Beim Bauwerksentwurf ist dementsprechend sicherzustellen, dass die Bruchfrequenz nicht in der Nähe der Eigenfrequenz liegt [1]. Die Frequenz der Eisbelastung (f_{Eis}) kann nach folgender Gleichung berechnet werden [1].

$$f_{\text{Eis}} = \frac{v_{\text{Eis}}}{L_{\text{Riss}}} \quad (4.17)$$

Die für die Berechnung der Bruchfrequenz relevante Risslänge (L_{Riss}) kann über den Durchmesser des Konus auf Höhe der Wasserlinie sowie den Faktor (ζ) berechnet werden (s. Gleichung 4.18) [1]. Der Faktor (ζ) wird dabei über das Verhältnis von $\frac{\gamma_w \cdot D^2}{\sigma_f \cdot h}$ bestimmt (s. Abbildung 4-14).

$$L_{\text{Riss}} = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot D \quad (4.18)$$

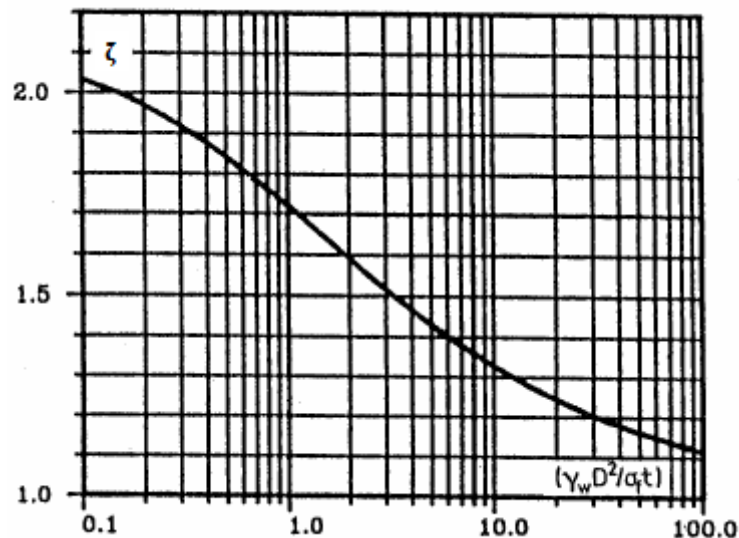


Abbildung 4-14: Faktor für die Berechnung der Risslänge [1].

In der Praxis hängt die Risslänge auch von der Treibgeschwindigkeit des Eises ab und beträgt in etwa dem 3 bis 10-fachen der Eisdicke [18]. Diese bleibt in der Gleichung (4.18) unberücksichtigt was zu hohen Unsicherheiten bei der Berechnung der Bruchfrequenz führt. Beim Bauwerksentwurf muss aus diesem Grund ein relativ großer Frequenzbereich angenommen werden, um eine hinreichende konstruktive Sicherheit gewährleisten zu können [1].

Der Einsatz von geneigten Gründungsstrukturen führt grundsätzlich zu einer Reduzierung der dynamischen Lasten. Dieser Effekt kann noch verstärkt werden, wenn es vor der OWEA zu Eisansammlungen kommt. Die Eisteile verhindern dabei den direkten Kontakt zwischen Eisschicht und Gründungsstruktur und wirken dadurch als Dämpfungspuffer zwischen Eis und OWEA [18].

4.4.4 Belastungen durch Tidenhub

Vertikale Belastungen durch an der Offshore – Gründungsstruktur festgefrorenem Eis können durch Veränderungen des Wasserstandes entstehen [5]. Steigt der Wasserstand, wirkt die Auftriebskraft des Wassers auf die Eisdecke ein. Sinkt der Wasserstand, wird die Anlage durch die Gewichtskraft des Eises belastet. Die dabei wirkenden Kräfte werden entweder durch die Scherfestigkeit zwischen Eisschicht und Bauwerk oder durch die Biegefestigkeit begrenzt [10].

Vertikale Lasten begrenzt durch die Scherfestigkeit:

$$F_{v,\sigma_s} = A_{\text{Kontakt}} \cdot \sigma_s \quad (4.19)$$

Vertikale Lasten begrenzt durch die Biegefestigkeit:

$$F_{v,\sigma_f} = 0,6 \cdot A_{\text{Kontakt}} \cdot \sqrt{\sigma_f \cdot \rho_W \cdot g \cdot \Delta z} \quad (4.20)$$

Die Fläche (A_{Kontakt}) beschreibt in beiden Gleichungen den Kontakt zwischen Bauwerk und Eisdecke ($A = \pi \cdot D \cdot h$). Die Scherfestigkeit (σ_s) zwischen Meereis und einer Konstruktion aus Stahl kann mit $\sigma_s = 0,3 \text{ MPa}$ angenommen werden. Für den Kontakt mit Gründungsstrukturen aus Beton gilt $\sigma_s = 1,0 \text{ MPa}$ [10]. In Gleichung (4.20) wird die Schwankung des Wasserstandes durch den Tidenhub (Δz) beschrieben. Grundsätzlich wird die wirkende Hublast bei großen Eisdicken durch die Biegefestigkeit begrenzt, wohingegen bei geringen Eisdicken die Scherfestigkeit zwischen Fundament und Eisdecke als maßgebend angenommen werden kann [8].

Bei der Auslegung von OWEA müssen aus Tidenhub resultierende Vertikallasten in der Regel nicht weiter berücksichtigt werden, da die Anlagen schwer genug sind, um den Kräften zu widerstehen [8].

5 Maßnahmen zur Reduzierung von Eislasten

Um eine OWEA vor Eislasten zu schützen, können verschiedene Maßnahmen getroffen werden. Zum einen kann versucht werden das Aufeinandertreffen von Meereis und OWEA zu verhindern. Zum anderen gibt es die Möglichkeit den Versagensmechanismus des Eises so zu beeinflussen, dass es zum Versagen des Eises durch Biegung kommt. Weitere Maßnahmen können Verstärkungen, spezielle Beschichtungen sowie dämpfend wirkende Materialien, die lokal im Bereich des Eisangriffs installiert werden, sein.

5.1 „Ice – Cones“

Die am häufigsten angewandte Schutzmaßnahme sind sogenannte „Ice- Cones“ [19]. „Ice – Cones“ sind konusförmige Strukturen die im Bereich der Wasserlinie angebracht werden und dafür sorgen, dass das Eis infolge von Überschreitung der Biegefestigkeit bricht.



Abbildung 5-1: „Ice – Cones“ im OWP "Nysted" [22].

Wie bereits in den Kapiteln 4.3.2 und 4.4.2 (geneigte Gründungsstrukturen) genauer beschrieben, wirken beim Versagen durch Biegung wesentlich geringere Kräfte als beim Versagen durch Druck. Um eine für OWEA optimale Lastreduzierung gewährleisten zu können, müssen bei der Auslegung von „Ice – Cones“ verschiedene Parameter berücksichtigt werden. Es sollte zum Beispiel durch die Abmessung des Konus sichergestellt sein, dass das Eis nur an der dafür vorgesehenen, geneigten Struktur zerbricht [10].

5.1.1 Tests an „Ice – Cones“

Im Rahmen der in Kapitel 4.4.2 (vertikale Gründungsstrukturen) beschriebenen Lastmodellierungen, wurden neben den Tests an vertikalen Gründungsstrukturen auch Tests zur Lasteinwirkung an zwei verschiedenen konusförmigen Strukturen durchgeführt [14]. Die Tests dienten neben der Darstellung der wirkenden Lasten dazu, die optimalen Abmessungen für „Ice – Cones“ im Bereich der dänischen Ostsee zu ermitteln [19].

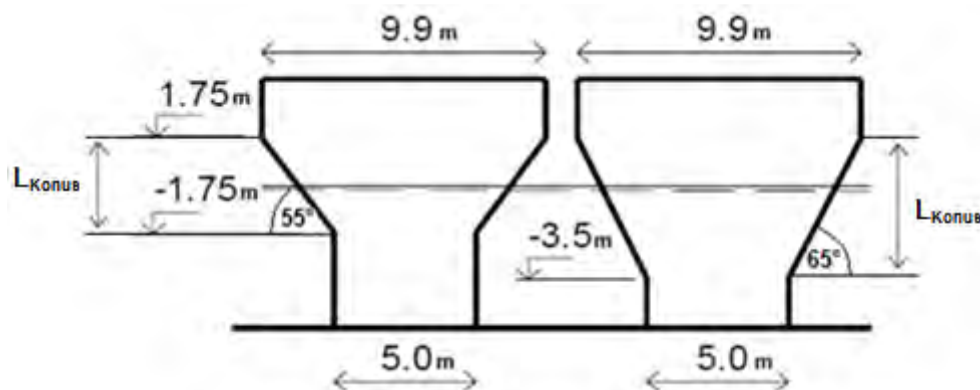


Abbildung 5-2: Originalabmessungen der "Ice - Cones", die bei den Tests im NRC untersucht wurden [19].

Die Abbildung 5-2 zeigt die Originalabmessungen für die bei der Lastmodellierung verwendeten „Ice – Cones“. Für die Modellierung wurden diese im Verhältnis 1:26 nachgebaut. Im Weiteren wird sich auf die Originalabmessungen sowie die hochgerechneten Ergebnisse bezogen.

Der untere und obere Durchmesser war in beiden Modellen identisch (s. Abbildung 5-2). Der Neigungswinkel betrug beim ersten Konus 55° und beim zweiten 65° [19]. Die Oberkante der Abschrägung wurde bei beiden Modellen auf 1,75 m über dem Pegelnullpunkt festgelegt. Dementsprechend liegt die Unterkante des zweiten Modells aufgrund des größeren Neigungswinkels unter der des ersten (s. Abbildung 5-2). Die Eigenschaften des Eises sowie weitere ortsgebundene Parameter entsprachen auch hier den in Kapitel 4.4.2 (vertikale Gründungsstrukturen) aufgeführten Bedingungen. Um die Abhängigkeit von Wasserstand und Driftgeschwindigkeit untersuchen zu können, wurden sowohl der Wasserstand als auch die Treibgeschwindigkeit des Eises während der Versuche variiert [19].

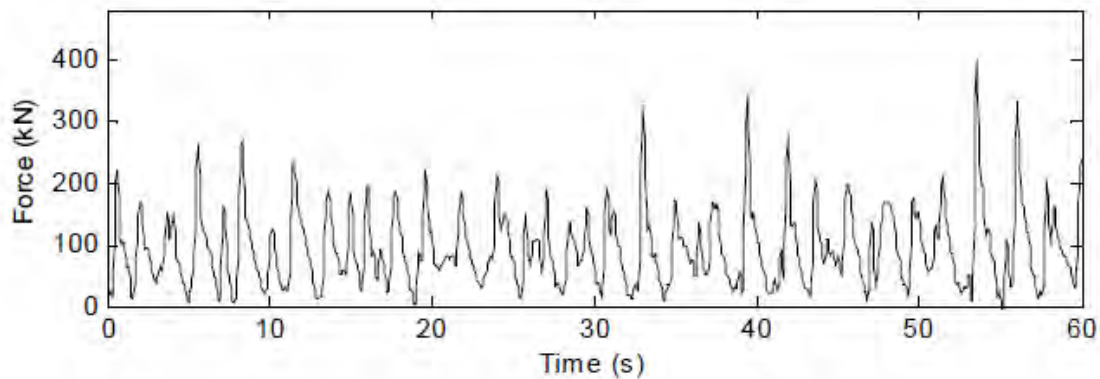


Abbildung 5-3: Lastprofil eines um 55° geneigten "Ice - Cones" [19].

Die Abbildung 5-3 zeigt ein Lastprofil des um 55° geneigten Konus [19]. Der Wasserstand wurde bei dieser Testreihe so angehoben, dass das Eis knapp unterhalb der Konusoberkante in einer Höhe von 1,5 m mit der Anlage kollidierte. Die mittlere horizontale Belastung lag bei etwa 100 kN und damit auf einem sehr niedrigen Level. In den meisten Fällen lagen die, beim Versagen durch Biegung, ermittelten Horizontallasten auf einem höheren Niveau zwischen 0,5 und 0,75 MN. Die Lasten an dem um 55° geneigten Konus waren dabei grundsätzlich geringer, als die an dem anderen Konus [19].

Für die Risslänge wurde ein typischer Wert von 2,5 m beobachtet [19]. Für die Bruchfrequenz bedeutet das, bei einer Treibgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, eine Frequenz von 0,4 Hz (s. Gleichung 4.17).

Durch die Variation des Wasserstandes, konnten die wirkenden Eislasten für verschiedene Konusdurchmesser untersucht werden. Die Ergebnisse wiesen dabei eine große Streuung auf, wobei die Messwerte denen aus Feldversuchen ähnelten [19]. Durch die relativ große Streuung konnte kein genauer Zusammenhang zwischen Eislast und Konusdurchmesser auf Höhe der Wasserlinie festgestellt werden, weshalb die Ergebnisse im Folgenden unabhängig vom Durchmesser dargestellt werden [19].

Eines der Hauptkriterien, welches beim Design von „Ice – Cones“ beachtet werden sollte, ist die Länge der konusförmigen Struktur [19]. Die Konuslänge (L_{Konus}) steht in engem Verhältnis mit dem Neigungswinkel (α) sowie dem oberen Konusdurchmesser und kann beispielsweise über die trigonometrischen Winkelfunktionen berechnet werden. Grundsätzlich wird die Länge des Konus durch die Parameter Tidenhub und Eisdicke beeinflusst. Um sicherzustellen, dass das Meereis an der dafür vorgesehenen Struktur versagt, wurden in der Vergangenheit sehr konservative Werte für die Konuslänge angenommen [19]. Eine Überdimensionierung hat zum einen zur Folge, dass die zusätzlichen Kosten für „Ice – Cones“ signifikant ansteigen. Zum anderen wird die Geometrie der Anlage auf Höhe der Wasserlinie so verändert, dass die Einwirkungen anderer Umwelteinflüsse, wie beispielsweise Wellenlasten, durch die größere Angriffsfläche negativ beeinflusst werden [19].

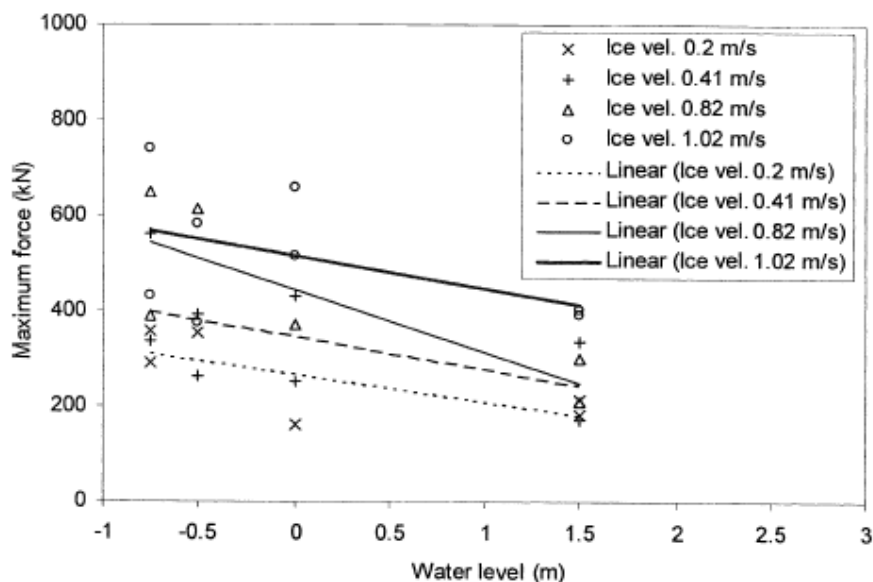


Abbildung 5-4: Maximale Eislast in Abhängigkeit vom Wasserstand und der Treibgeschwindigkeit [19].

Um in Zukunft weitere Überdimensionierungen zu vermeiden, wurde der Wasserstand zwischen den Testreihen so verändert, dass die Modelle über ihre gesamte Länge belastet wurden. Eine ausreichende Länge galt als gegeben, wenn das Eis auch unter extremen Bedingungen durch Biegung versagt.

An dem um 55° geneigten Konus konnte festgestellt werden, dass Meereis mit einer Dicke von ca. 0,6 m, was dem Maximum im Bereich der dänischen Ostsee entspricht, bis zu einem Wasserstand von $WS \geq -0,75$ m ausschließlich durch Biegung versagt (s. Abbildung 5-4) [19]. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass die Driftgeschwindigkeit des Eises dabei nur einen geringen Einfluss auf die wirkenden Maximallasten hat (s. Abbildung 5-4) [19]. Bei Wasserständen kleiner als $-0,75$ m kam es an dem gleichen Konus vermehrt zum Versagen durch Druck. Die dabei wirkenden horizontalen Maximallasten betragen bis zu 2 MN [19].

5.1.2 Auslegung von „Ice – Cones“

„Ice – Cones“ bestehen grundsätzlich aus einem formgebenden Stahlgerüst und Beton. Da Schwergewichtsfundamente in der Regel ebenfalls aus Beton gefertigt werden, kann der Konus direkt in die Struktur des Fundamentes integriert werden [23]. Als Beispiel für „Ice – Cones“, die in das Design von Schwergewichtsfundamenten integriert wurden, seien an dieser Stelle die Anlagen der dänischen OWP's „Nysted“ und „Middelgrunden“ genannt. Bei Gründungsstrukturen wie Monopiles oder Tripods wird der Konus hingegen nachträglich aufgesetzt und anschließend verschweißt [24].

Generell sollte ein Konus so ausgelegt werden, dass es zu keiner Zeit zum Versagen des Eises an der vertikalen Struktur kommt. Das hierfür wichtigste Kriterium ist die Konuslänge (L_{Konus}). Die Tests in Kapitel 5.1.1 haben gezeigt, dass das Eis an dem beschriebenen Konus bis zu einem $WS \geq -0,75$ m ausschließlich durch Biegung versagt [19]. Da der Tidenhub auch im Bereich der deutschen Ostsee sehr gering ist, würden die Abmessungen des im Test verwendeten „Ice – Cones“ vollkommen ausreichen, um den gewünschten Bruch durch Biegung zu gewährleisten.

Wie ebenfalls in Kapitel 5.1.1 beschrieben, können „Ice – Cones“ nicht beliebig groß dimensioniert werden, da sich die Veränderung der Wasserliniengeometrie negativ auf das Lastverhalten anderer Umwelteinflüsse auswirkt [19]. In Regionen, in denen mit großen Wasserstandsschwankungen zu rechnen ist, sollten die vom Eisangriff betroffenen vertikalen Anlagenteile deshalb so ausgelegt werden, dass sie den auftretenden Eislasten widerstehen [10].

Um ein optimales Design von „Ice – Cones“ gewährleisten zu können und zu vermeiden, dass die Eislasten das Design der Gründungsstruktur maßgeblich beeinflussen, sollte der Neigungswinkel des Konus so angepasst werden, dass die Eislasten minimal unterhalb der Wellenlasten liegen [1]. Bei nach unten geneigten „Ice – Cones“ ist außerdem darauf zu achten, dass die Wassertiefe größer als 5 m ist, da es sonst zum Aufsetzen des gebrochenen Eises auf dem Meeresboden kommen kann [12].

5.1.3 Effizienz

Die durch Treibeis auf Gründungsstrukturen von OWEA wirkenden statischen Eislasten können durch den Einsatz von „Ice – Cones“ erheblich reduziert werden. Vergleicht man die Ergebnisse der in Kapitel 4.4.2 und 5.1.1 beschriebenen Modellversuche, kann an einem um 55° geneigten Konus eine Reduzierung der horizontalen Eislasten von bis zu 75 % festgestellt werden [19].

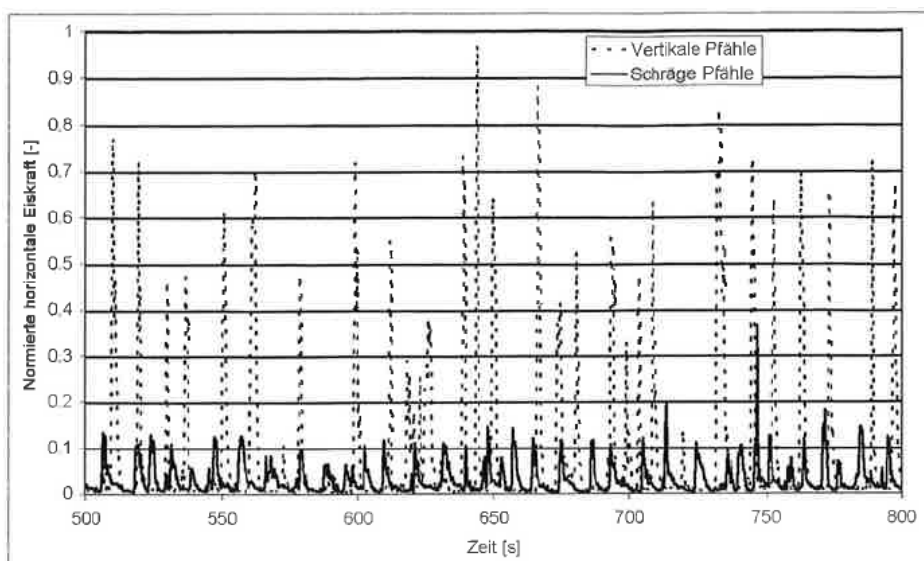


Abbildung 5-5: Horizontale Eiskräfte auf senkrechte und geneigte Oberflächen [12].

Andere Untersuchungen zeigen sogar noch deutlichere Reduzierungspotenziale [12]. Im Rahmen des Forschungsprojektes „MATRA – OSE“ wurden Vergleichsmessungen von Eislasten an Strukturen mit einem Neigungswinkel von 60° und an vertikalen Oberflächen durchgeführt. Demnach konnten die horizontalen Eislasten durch die Neigung der Struktur auf ca. 10 bis 20 % der Eislasten gegen eine vertikale Struktur reduziert werden (s. Abbildung 5-5) [12].

Dynamische Belastungen an OWEA können durch den Einsatz von „Ice – Cones“ reduziert werden [18]. Durch Vibrationen, die aus dem Scherversagen der Eisschicht resultieren, kann es jedoch auch an geneigten Strukturen zu „lock – in“ Effekten kommen, wodurch die Betriebsfestigkeit der Anlage erheblich reduziert wird. Diese Effekte lassen sich durch den Einsatz von „Ice – Cones“ nicht ausschließen und sollten deshalb bei der Auslegung der OWEA berücksichtigt werden (s. Kapitel 4.4.3) [12].

5.1.4 Kosten

Durch den Einsatz von „Ice – Cones“ entstehen Zusatzkosten, die bei der Planung von OWP berücksichtigt werden müssen. Zum einen entstehen zusätzliche Kosten bei der Installation. Die zusätzlichen Installationskosten setzen sich aus den Kosten für die Schiffscharterung und den Personalkosten zusammen. Diese Kosten bleiben im Weiteren unberücksichtigt, da bei der Errichtung grundsätzlich schweres Gerät und Personal vor Ort sind, wodurch sich die zusätzlichen Installationskosten relativieren. Zum anderen müssen die Materialkosten miteinbezogen werden. Da die genauen Abmessungen von „Ice – Cones“ aus bestehenden Projekten nahezu unbekannt sind, werden die Materialkosten im Weiteren anhand von Überschlagsrechnungen erläutert.

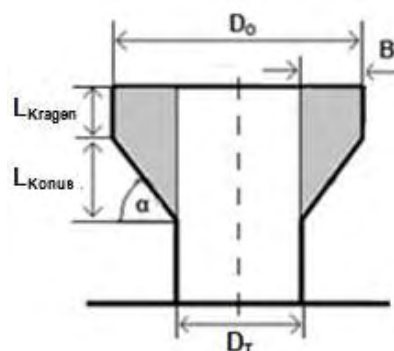


Abbildung 5-6: Querschnittsskizze des für die Kostenermittlung berechneten "Ice - Cones".

Um nur die zusätzlichen Materialkosten für den Konus zu ermitteln, wird bei der Berechnung lediglich das Volumen der in der Abbildung 5-6 grau gefärbten Fläche berücksichtigt. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der Konus ausschließlich aus Beton gefertigt wird. Das formgebende Stahlgerüst bleibt dementsprechend unberücksichtigt.

Das zusätzliche Volumen des Konus lässt sich über die folgenden Gleichungen berechnen [25]:

$$V_{\text{Zusatz}} = V_{\text{Konus}} + V_{\text{Kragen}} - V_{\text{Zylinder}} \quad (5.1)$$

mit
$$V_{\text{Konus}} = \frac{L_{\text{Konus}} \cdot \pi}{12} \cdot (D_O^2 + D_O \cdot D_T + D_T^2), \quad (5.2)$$

$$V_{\text{Kragen}} = \frac{\pi \cdot D_O^2}{4} \cdot L_{\text{Kragen}} \quad (5.3)$$

und
$$V_{\text{Zylinder}} = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot (L_{\text{Konus}} + L_{\text{Kragen}}) \quad (5.4)$$

Bei der Berechnung des zusätzlichen Volumens werden die Parameter Konuslänge (L_{Konus}), Kragenlänge (L_{Kragen}) und Neigungswinkel (α) als konstant angenommen. Der Kragen des Konus (Teil oberhalb der Abschrägung) wird mit einer Länge von 1 m beaufschlagt und der Neigungswinkel beträgt 55° (s. Abbildung 5-6). Aus den in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Untersuchungen geht hervor, dass bei dem geringen Tidenhub der Ostsee eine Konuslänge von 3,5 m, für diese Region, als vollkommen ausreichend angesehen werden kann [19]. Im Rahmen der Beispielrechnung wird die Konuslänge deshalb auf einen Wert von 3,5 m festgelegt. Um das Verhältnis zwischen Anlagengröße und zusätzlichen Kosten für „Ice – Cones“ besser darstellen zu können, werden die Kosten für fünf verschiedene Durchmesser (D_T) von 3 bis 7 m berechnet. Der für die Berechnung nach Gleichung (5.2) und (5.3) notwendige obere Konusdurchmesser (D_O) kann über die Konusbreite (B) und den Durchmesser (D_T) ermittelt werden.

Durchmesser (D_T) in m	Konusvolumen (V_{Zusatz}) in m ³	Konusmasse in kg	Zusatzkosten in €
3,0	104,40	240.121	48.024
4,0	125,57	288.818	57.764
5,0	146,75	337.515	67.503
6,0	167,92	386.213	77.243
7,0	189,09	434.910	86.982

Tabelle 5-1: Zusatzkosten für einen um 55° geneigten Konus in Abhängigkeit des Durchmessers.

In Tabelle 5-1 werden die Ergebnisse der Volumenberechnung, die Masse des Konus sowie die zusätzlichen Materialkosten für verschiedene Durchmesser dargestellt. Die zusätzliche Betonmasse lässt sich aus der Betondichte und dem Konusvolumen berechnen. Die Trockenrohddichte von Normalbeton liegt zwischen 2000 und 2600 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und wird bei dieser Übersichtsrechnung mit 2300 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen [26]. Die Kosten für den verwendeten Beton belaufen sich in etwa auf 0,2 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ [23].

Die durch den „Ice – Cone“ zusätzlich entstehenden Materialkosten liegen demnach, je nach Anlagengröße, zwischen 48000,00 € und 87000,00 € (s. Tabelle 5-1). Beim Einsatz von Schwergewichtsfundamenten relativieren sich die Kosten, da das zusätzliche Gewicht der Stabilisierung des Fundaments zu Gute kommt [27].

5.2 Weitere Reduzierungsmaßnahmen

5.2.1 Eissperren

Eissperren dienen dazu den Kontakt von Treibeis und OWEA zu verhindern. Im einfachsten Fall bestehen Eissperren aus Pfählen, Steinschüttungen oder Pontons, die um die Anlage herum installiert werden [12]. Sie sollten unter Beachtung der Strömungs- und Windverhältnisse so angeordnet werden, dass sie herantreibende Eisschollen weitestgehend von den OWEA fernhalten. Die genaue Position der Sperren kann zum Beispiel über Simulationsprogramme ermittelt werden [6].

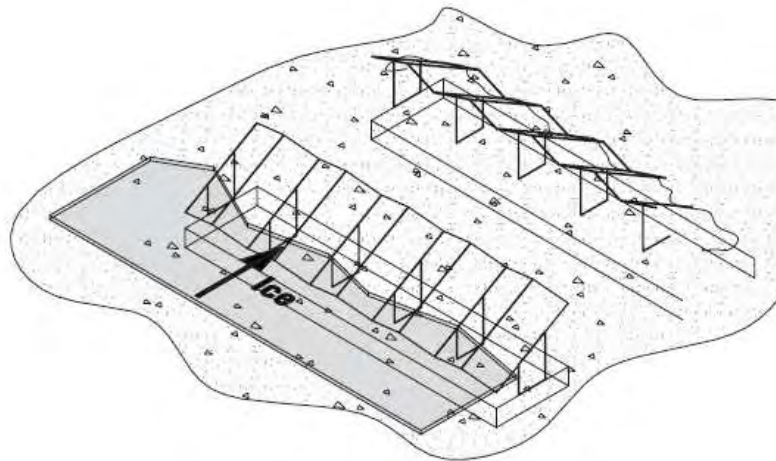


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung einer geneigten Eissperre [6].

Das Treibeis versagt, je nach Wasserliniengeometrie der Barriere, auf unterschiedliche Art und Weise. Untersuchungen haben gezeigt, dass Pontons mit einem Neigungswinkel von ca. 30° besonders effektiven Schutz gewährleisten (s. Abbildung 5-7) [6]. An der geneigten Struktur kommt es dabei zu Überschreitungen der Biegefestigkeit und damit zum Bruch des Eises (s. auch Kapitel 4.4.2 (geneigte Gründungsstrukturen)). Wie auch an geneigten Gründungsstrukturen, kann es an nach oben gerichteten Barrieren vermehrt zum Aufstau von gebrochenem Eis kommen. An Gründungsstrukturen sollte dieser Effekt so weit es geht vermieden werden, da es durch die Eisauftürmungen zu zusätzlichen Belastungen der Anlage kommen kann. Im Gegensatz dazu ist das Auftürmen von

Eismassen an einem eisbrechenden Ponton gewünscht, da die Barriere durch das Eis zusätzlich stabilisiert wird [18].

Der große Vorteil dieser Schutzmaßnahme ist, dass der direkte Kontakt von großen Eisschollen mit der OWEA verhindert wird. Die OWEA wird somit weitestgehend vor statischen als auch vor dynamischen Eislasten geschützt [12]. Ein weiterer Vorteil ist, je nach Bauform, die freie Beweglichkeit von Barrieren. Schwimmende Pontons könnten zum Beispiel in Abhängigkeit der Jahreszeit in unterschiedliche Regionen geschleppt werden, in denen akut mit Eisgang zu rechnen ist.

5.2.2 Lokale Maßnahmen an der OWEA

Um OWEA vor horizontalen Eislasten zu schützen, können Verstärkungen im Bereich des Eisangriffs in Betracht gezogen werden. Mögliche Verstärkungsmaßnahmen sind zum Beispiel die Montage von Stahlplatten oder eine Erhöhung der Wanddicke [6]. Die betroffenen Anlagenteile werden dabei bewusst überdimensioniert, um den aus Meereis resultierenden Kräften zu trotzen. Eine Reduzierung der wirkenden Lasten findet dementsprechend nicht statt. Die in Verbindung mit Meereis auftretenden dynamischen Belastungen bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Materialien, die aus mehreren Komponenten bestehen und dadurch sehr gute Dämpfungseigenschaften aufweisen. Entsprechende Materialien sind derzeit Stand der Forschung [12].

Vertikale Eislasten, die durch das Festfrieren von Meereis an der Gründungsstruktur entstehen, können durch den Gebrauch von speziellen Beschichtungen vermieden werden. Zurzeit existieren eine Reihe von Beschichtungen, die entweder die Oberflächenvereisung verhindern oder die Enteisung erleichtern [12].

6 Fazit und Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die „Auswirkungen von Meereis auf Gründungsstrukturen von OWEA“ untersucht. Generell konnte dabei festgestellt werden, dass sich die durch Meereis verursachten Auswirkungen fast ausschließlich in Form von Lasteinwirkungen widerspiegeln.

Als Meereis wird das Eis bezeichnet, welches sich durch das Gefrieren von Meerwasser bildet. Im Vergleich zu Süßwassereis stellt Meereis ein hochkomplexes Medium dar. Die Entstehungsgeschichte, die Kristallstruktur sowie das Alter des Eises haben dabei einen erheblichen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Eises. Zur Bildung von Meereis kommt es grundsätzlich in sehr kalten Regionen wie dem Nord- oder Südpolarmeer. In deutschen Gewässern muss nur in der Ostsee mit Meereis und den damit verbundenen Auswirkungen gerechnet werden.

An Offshore – Gründungsstrukturen können durch Meereis sowohl vertikale als auch horizontale Kräfte wirken. Da vertikale Lasten im Verhältnis zur Anlagengröße sehr gering ausfallen, müssen bei der Auslegung von OWEA grundsätzlich nur horizontale Eislasten berücksichtigt werden. Horizontale Eislasten können auf unterschiedliche Art und Weise entstehen und sind dabei stark von der Bauwerksgeometrie auf Höhe des Wasserspiegels sowie der Art der Eisinteraktion abhängig.

Die maximale Belastung von OWEA wird durch die Festigkeitseigenschaften des Eises und die Art und Weise, mit der das Eis an der Gründungsstruktur versagt, beschrieben. Die beiden in Bezug auf Eislasten wichtigsten Festigkeiten sind die Druckfestigkeit und die Biegefestigkeit. Die Druckfestigkeit ist beim Druckbruchversagen der entscheidende Parameter und tritt am häufigsten an vertikalen Gründungsstrukturen wie Monopiles oder Tripods auf. Im Gegensatz dazu versagt das Eis an geneigten Strukturen in der Regel durch Überschreitungen der Biegefestigkeit. Im Rahmen der Recherche konnte festgestellt werden, dass die größten Belastungen aus dem Druckbruchversagen resultieren. Grund dafür ist die wesentlich höhere Druckfestigkeit von Meereis. Um Eislasten an maritimen Bauwerken zu reduzieren ist es deshalb eine gängige Methode, die Wasserliniengeometrie des Bauwerks so zu verändern, dass das Eis durch Überschreitungen der Biegefestigkeit bricht.

Eine weitere Unterscheidung von Belastungen durch Meereis erfolgt in statische und dynamische Belastungen. Bei statischen Eislasten handelt es sich um Belastungen, die Extremereignisse darstellen. Dynamische Belastungen können bei bestimmten Versagensformen auftreten. Kommt es dabei zur Anpassung der Bruchfrequenz des Eises an die Eigenfrequenz der Anlage kann es zu sogenannten „lock – in“ Effekten kommen, wodurch die Betriebsfestigkeit der Anlage erheblich reduziert wird. Im Vergleich zu statischen Eislasten stellen dynamische Eislasten das weitaus größere Problem dar. Beide Belastungsformen sollten bei der Auslegung von OWEA berücksichtigt werden.

Eislasten lassen sich anhand von Messungen, Modellversuchen oder Berechnungen bestimmen. Die Ermittlung von Eislasten gestaltet sich grundsätzlich als schwierig. Messungen an Referenzobjekten im Bebauungsgebiet oder die Modellierung von Eislasten im Eistank sind in der Regel sehr aufwendig und teuer und lassen sich deshalb nicht für jedes Offshore – Projekt durchführen. Aus diesen Gründen wird bei der Auslegung von OWEA in der Regel auf Berechnungsansätze zurückgegriffen. Um die Genauigkeit von Berechnungsansätzen zu überprüfen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Vergleich zwischen Mess – und Berechnungsergebnissen durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse aus Berechnungen deutlich über denen aus Messungen liegen. Dies kann zum einen daran liegen, dass die verwendeten Berechnungsansätze für andere maritime Bereiche wie die Öl- und Gasindustrie entworfen wurden und sich nicht zu hundert Prozent auf OWEA übertragen lassen. Zum anderen konnte bei der Recherche festgestellt werden, dass die wirkenden Lasten unter anderem von der Treibgeschwindigkeit des Eises abhängen. Diese bleibt bei den meisten Berechnungsansätzen jedoch unberücksichtigt, wodurch weitere Unsicherheiten entstehen können. Ein weiterer Punkt, der zu Fehlern bei der Berechnung von Eislasten führen kann, sind Unsicherheiten bei den standortspezifischen Eingangsparametern. Viele dieser Parameter sind in der Praxis schwer zu bestimmen, sodass oft Annahmen getroffen werden müssen, welche die Berechnungsergebnisse verfälschen.

Die aufgeführten Unsicherheiten lassen zu dem Schluss kommen, dass Eislastberechnungen grundsätzlich kritisch zu hinterfragen sind. Um in Zukunft genauere Prognosen für OWEA tätigen zu können, ist in erster Linie ein fundiertes Wissen über das Interaktionsverhalten von Meereis an OWEA sowie die Aufzeichnung von Eisparametern in potentiellen Errichtungsgebieten von Nöten. Langzeitstudien oder die Darstellung von

speziellen Fragestellungen im Eistank können dabei helfen, dieses Wissen zu erlangen. Des Weiteren kann es Sinn machen Berechnungsansätze für OWEA zu entwickeln, um die aus Meereis resultierenden Belastungen in Zukunft besser beschreiben zu können und dadurch Kosten durch mögliche Überdimensionierungen einzusparen.

Um eine OWEA vor hohen Eislasten zu schützen, können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden. Die Recherche zeigt, dass die derzeit weitverbreitetste Methode der Einsatz von sogenannten „Ice – Cones“ ist. Das herantreibende Meereis versagt dabei durch die schräge Wasserliniengeometrie des Konus infolge von Überschreitungen der Biegefestigkeit. Der Vorteil von „Ice – Cones“ ist zum einen die deutliche Reduzierung der statischen Lasten, um bis zu 90 % gegenüber vertikalen Strukturen. Zum anderen kann der Konus beim Einsatz von Schwergewichtsfundamenten direkt in das Design des Fundamentes integriert werden. Das zusätzliche Gewicht dient dabei der Stabilisation des Fundamentes, sodass sich die durch den „Ice – Cone“ entstandenen Zusatzkosten relativieren. In Bezug auf andere Umwelteinflüsse wie zum Beispiel Wellenlasten, kann sich die Veränderung der Wasserliniengeometrie negativ auswirken. Es wird daher empfohlen den „Ice – Cone“ so zu bemessen, dass die auf die Anlage einwirkenden Eislasten nur minimal unter denen der Wellenlasten liegen.

Eine zum jetzigen Zeitpunkt noch kaum in Verbindung mit OWEA angewandte Schutzmaßnahme ist der Einsatz von Eissperren. Gründe dafür können die erschwerte Befestigung von Barrieren im und am Meeresboden sowie die damit verbundenen Kosten sein. Bei Pfahlbarrieren müssten die Pfähle beispielsweise in den Meeresboden gerammt werden, was je nach Wassertiefe und Bodenbeschaffenheit zu erheblichen Zusatzkosten führt. Um die durch Eissperren entstehenden Kosten so gering wie möglich zu halten, könnten in Zukunft sich selbst stabilisierende Pontons zum Einsatz kommen. Sollte bei Feldversuchen festgestellt werden, dass es auch unter extremen Bedingungen zu keinerlei Bewegungen der Pontons und somit zum sicheren Schutz der Anlage kommt, könnte der Einsatz von Eissperren auch für OWEA eine geeignete Alternative zu „Ice – Cones“ darstellen.

Grundsätzlich sollten bei der Auslegung von OWEA Maßnahmen getroffen werden, die die einwirkenden Eislasten reduzieren. Welche Methode zum Einsatz kommt, muss dabei je nach Anforderungsprofil und örtlichen Gegebenheiten entschieden werden. Eine zum

Schutz der Anlage beitragende Überdimensionierung von Anlagenteilen im Bereich des Eisangriffs sollte nur dann in Betracht gezogen werden, wenn andere Schutzmaßnahmen unwirtschaftlich sind oder sich zu negativ auf andere Belastungsarten auswirken.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es sich bei dem behandelten Thema um ein sehr spannendes und komplexes Thema handelt. Die Erfahrungen aus anderen maritimen Bereichen können teilweise auf OWEA übertragen werden. Trotz des Erfahrungsaustausches zwischen den Branchen stellen Eislasten bei der Auslegung von OWEA den derzeit größten Unsicherheitsfaktor dar. Es sollte deshalb versucht werden, den jetzigen Wissensstand durch weitere explizite Untersuchungen an OWEA zu vertiefen.

7 Literaturverzeichnis

1. DNV Offshore Standard (2013): Design of Offshore Wind Turbine Structures [Service Dokument]
2. Morten Bjerkås (2006): Ice actions on offshore structures, Norwegian University of Science and Technology, Fakultät Marine Sciences and Technology, Trondheim, [Doktorarbeit]
3. Meereisportal des Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung: Was ist Meereis, [online] unter http://www.meereisportal.de/de/meereiswissen/was_ist_meereis/, (abgerufen am 30.09.2014)
4. Petra Dremmler (2011): Das Meer – Wasser, Eis und Klima, Kapitel 2: Eis auf dem Meer, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
5. Dirk Carstensen (2008): Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden
6. Germanischer Lloyd (2005): Guideline for the Construction of Fixed Offshore Installations in Ice Infested Waters, Hamburg [Service Dokument]
7. Natalija Schmelzer und Jürgen Holfort (2012): Klimatologischer Eisatlas für die westliche und südliche Ostsee, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock [Report]
8. Lennart Fransson und Lars Bergdahl (2009): Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads, [Online] unter http://www.elforsk.se/Global/Vindforsk/Rapporter%20fran%20Vindforsk%20II/09_55_report.pdf, (abgerufen am 08.10.2014)
9. American Petroleum Institute (1995): Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions, Washington, [Service Dokument]

10. IEC 61400-3 (2009): Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines (Annex E)
11. Jörg Höttcher (2013): Handbuch Offshore – Windenergie: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte, Oldenbuorg Wissenschaftsverlag, München
12. Alexandra Weihrauch, Joachim Berger und Karl-Ulrich Evers (2004): Eisbelastungen auf Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, erschienen im HANSA International Maritim Journal, Jahrgang 141, Nr. 11 [Journal]
13. BSH Standard (2007): Konstruktive Ausführungen von Offshore – Windenergieanlagen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, [Service Dokument]
14. Anne Barker, Garry Timco, Helge Gravesen und Per Vølung (2005): Ice loading on Danish wind turbines: Part 1. Dynamic model tests, in Cold Regions Science and Technology 41 1-23 [Journal]
15. Flemming Thunbo Christensen und Helge Gravesen (2003): Determination of extrem ice forces, [online] unter http://www.researchgate.net/publication/260585710_DETERMINATION_OF_EXTREME_ICE_FORCES_LECTURE_NOTES, abgerufen am (20.10.2014)
16. Cornelia Ehlert (2006): Ermittlung von Dämpfungsparametern für die Simulation nichtlinearer Federbedingungen für Offshore Pfahlgründungen, Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Weimar [Diplomarbeit]
17. Tuomo Kärnä und Peter Jochmann (2003): Field observations on ice failure modes, VTT Technical Research Centre of Finland and Hamburg Ship Model Basin, [online] unter http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/arki/julkaisut/strice/Observed%20Failure%20Modes_POAC03.pdf, abgerufen am (18.10.2014)
18. DIN EN ISO 19906 (2010): Petroleum and natural gas industries – Arcitic offshore structures

19. Helge Gravesen, Søren L. Sørensen, Per Vølund, Anne Barker und Garry Timco (2005): Ice loading on Danish wind turbines: Part 2. Analyses of dynamic model test results, in Cold Regions Science and Technology 41 25-47 [Journal]
20. Joachim Schwarz (2001): Validation of Low Level Forces on Coastal Structures, International Society of Offshore and Polar Engineers, 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 17 – 22 Juni, Stavanger, Norwegen [Report]
21. Robert Gasch und Jochen Twele (2012): Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 8. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden
22. Charlotte Boesen und Henriette Hassing Corling (2006): Danish Offshore Wind – Key Environmental Issues, DONG Energy, [online] unter <http://188.64.159.37/graphics/Publikationer/Havvindmoeller/kap03.htm>, abgerufen am (28.10.2014) [Report]
23. Per Vølund (2005): Concrete is the future for Offshore Foundations, Copenhagen Offshore Wind 2005, [online] unter http://wind.nrel.gov/public/SeaCon/Proceedings/Copenhagen.Offshore.Wind.2005/documents/papers/Low_cost_foundations/P.Voelund_Concrete_isthefutureforoffshorefoundations.pdf, abgerufen am (29.10.2014)
24. 4C Offshore: Monopile Support Structures, [online] unter <http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid269.html>, abgerufen am (31.10.2014)
25. Lothar Papula (2009): Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 10. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden
26. Baunetzwissen: Normalbeton, [online] unter http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton_Normalbeton_150994.html, abgerufen am (02.11.2014)
27. H. Gravesen, B. Peteresen, S. L. Sørensen und Per Vølund (2003): Ice forces to wind turbine foundations in Denmark, 17th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 03), 16 – 19 Juni, Trondheim, Norwegen [Report]