



# Die Natur umgedreht

QUALITÄTSCHECK.  
Vor jedem Testlauf wird eine  
Platte aus der acht Zentimeter  
dicken Eisfläche ausgesägt und  
einem Drucktest unterzogen.

Einer der größten Eistanks der Welt steht in Hamburg. Die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) betreibt hier unter anderem Spitzenforschung für Offshore-Unternehmen, die im Eismeer bauen wollen. Eine Reportage über Crashtests im künstlichen Eis von Hans Wille (Text) und Ronald Frommann (Fotos)

Heute ist einer dieser Tage im Sommer 2018, an denen es schon morgens um zehn 30 Grad warm ist. Gesa Zieler trägt gefütterte Arbeitsstiefel, zieht sich die dicke Winterjacke an und geht durch eine Stahltür an ihren Arbeitsplatz. Sofort wird ihr Atem als Dampfschwade sichtbar. Vier Grad herrschen momentan im Eistank der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA), einem der größten der Welt. Zieler ist Projektmanagerin in der Abteilung Arc-

tic Technology. Sie wird heute den abschließenden einer langen Reihe von Tests durchführen. Es geht um die Frage, wie Monopiles dimensioniert sein müssen, um dem Wintereis der Ostsee standzuhalten. „Diese leichten und schmalen Träger für Windräder sind hochfrequente Strukturen“, erläutert die Ingenieurin. Wenn deren Eigenfrequenz durch das treibende Eis angeregt wird, kann ein Monopile, auf dem die 150 Tonnen schwere Gondel sitzt, sich immer mehr →



VERSUCHSANORDNUNG: HSVA-Forscherin Gesa Ziemer vergewissert sich vor dem Test, dass alle Daten im Notebook auflaufen.

während des Crushens visualisieren. Wo genau an der Struktur wird der Eisdruck besonders stark? Wie verteilt sich der steigende Druck auf der Fläche? Wo bricht das Eis zuerst? Sind Regelmäßigkeiten zu erkennen?

#### WIE DIE KRÄFTE WIRKEN

Zudem misst ein Laser den Abstand der Vorderkante der Struktur zum Schleppwagen, über die Zeit lassen sich so die Bewegung der Struktur und ihre Schwingung nachvollziehen. Eine Kraftmesswaage nimmt die Summe aller Kräfte auf, die auf die Trägerplatte der Struktur einwirken, in Wirklichkeit also auf den Meeresboden. Außerdem misst ein Beschleunigungsmesser die Geschwindigkeit des Schleppwagens, quasi das Eistempo in der Ostsee.

Um die Realität der nördlichen Ostsee in einem bitterkalten Februar maßstabsgetreu in die kleine Eiskiste von Hamburg-Barmbek zu transferieren, wendet Gesa Ziemer komplexe Berechnungen an. Ausgangspunkt ist stets der Maßstab der Struktur. „Das Eis können wir leider nicht linear skalieren. Immerhin unterliegen Festigkeit und Dicke demselben Korrelationsfaktor.“ Selbst den Salzgehalt berechnet sie passend zum verkleinerten Abbild. Eines muss das Eis immer sein: weiß. Einfach, weil es besser sichtbar ist als durchsichtiges Eis. Während des Gefrierprozesses blubbern von unten winzig kleine Luftblasen hoch, die im Eis eingeschlossen weiß erscheinen.

Richtiges Eis zu erstellen, ist keine Lappalie. Wenn die Luft im Eistank auf minus 18 Grad gekühlt ist, fährt der Schleppwagen einmal durch



ATTRAPPE. Mit dem roten, 15 Zentimeter dicken Aluminiumrohr simuliert das HSVA-Team im Testaufbau einen Monopile.

den Raum und sprüht einen feinen Nebel in die Luft, der sofort gefriert und in Form von kleinen Eiskristallen auf die Wasseroberfläche sinkt. Ist diese erste Eisschicht fertig ausgebildet, wird der Sprinkler abgeschaltet. Ab jetzt kann das Eis nur noch nach unten in den Tank wachsen. „So schaffen wir eine senkrechte, faserähnliche Struktur, die ausgesprochen gleichmäßig ist“, sagt Nis Schnoor. „Das Eis muss genau so sein wie jede frühere und jede spätere Eisschicht. Nur wenn wir immer vergleichbares Eis haben, sind →

IVOS: Ice-Induced Vibrations of Offshore Structures heißt das Projekt, an dem insgesamt acht Partner mitwirken.

→ in Schwingung versetzen, bis er an seiner schwächsten Stelle bricht, reißt, stürzt – versagt.

Wissenschaftlerin Ziemer spricht allgemein vom Versagen der Struktur. Eine Struktur, das ist jedes fest am Meeresboden verankerte Bauwerk wie zum Beispiel ein Monopile. Zwar gab es schon vor Jahrzehnten entsprechende Tests für die gigantischen Bauwerke der Öl- und Gasindustrie, die ebenfalls in Eismereen stehen. „Aber das sind massive Industrieanlagen auf dicken Betonpfählen“, sagt Ziemer. „Die Berechnung der eisinduzierten Vibrationen solcher steifer Strukturen hilft uns bei den Monopiles nicht weiter.“

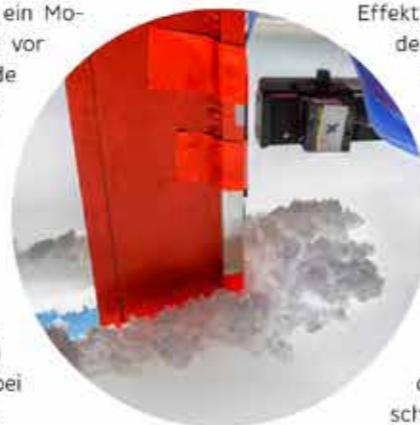
#### SCHIEBEN BIS ZUM CRUSHING

Sechs namhafte Player der Offshore-Branche, zwei davon aus der Windindustrie, finanzieren das Joint Industry Project IVOS (s. links) zusammen mit dem staatlichen Norwegian Research Council sowie der HSVA. „In diesem Forschungsprojekt entwickeln wir die Grundlagen für die dynamische Auslegung von Monopiles für die Ostsee, damit auch das ärgste Eis deren Eigen-

frequenz nicht anregen kann“, erläutert die studierte Schiffbauingenieurin Gesa Ziemer. „Im Eistank drehen wir die Natur um“, sagt sie. „In der Ostsee schiebt sich das Eis an die Struktur, hier schieben wir die Struktur an das Eis.“ Der Effekt bleibt der gleiche: Allein durch den Druck bricht das Eis zu krümeligem Crushed ice – das aussieht wie das in der Cocktailschale. Doch wo ist die Grenze des Druckbruchs? Ab wann versagt nicht mehr das Eis, sondern die Struktur?

Im Versuchsaufbau besteht die Struktur aus einem 15 Zentimeter dicken, rot lackierten Aluminiumrohr, das auf eine Trägerplatte geschweißt ist. Diese Konstruktion hängt kopfüber unter einer flexiblen Basis, die auf vier Aluminiumprofilen gelagert ist, die als Biegefedern wirken. Das kleine Modell bildet naturgetreu den Grad an Steifigkeit bzw. Weichheit nach, mit dem der riesige Monopile unter der Last des treibenden Eises in Schwingung gerät.

Die flexible Basis hängt wiederum an einem mächtigen Wagen auf Eisenbahnrädern. Dieser Schleppwagen überspannt die zehn Meter breite



KOLLISION. Wenn Eis und Struktur gegeneinander schieben, entsteht Crushed Ice – idealerweise.



**EISLABOR.** Die einheitliche Güte der Eisschicht wird regelmäßig mit einem Drucktest überprüft.



**AKRIBIE.** Damit die Ergebnisse reproduzierbar sind, müssen die Crewmitglieder die Testbedingungen stets sorgfältig dokumentieren.

Wie ein Lokführer sitzt Schnoor im beheizten Fahrstand des Schlepptwagens, dem einzigen Ort des Eiskanals, der angenehm temperiert ist. Um möglichst ruckelfrei loszufahren, startet er zwei Motoren gleichzeitig, die sich gegeneinander verspannen, also mit gleicher Kraft vor- bzw. zurückfahren wollen. Dadurch verharrt der Schlepptwagen in der Ruheposition. Zum wirklichen Start drosselt er minimal den Rückwärtsmotor, der Schlepptwagen geht sehr filigran in die Vorwärtsbewegung über. „Ich fahre heute rezeptgeführt“, sagt er. „Das heißt, im PC habe ich einen Fahrplan einprogrammiert, den der Schlepptwagen abfährt.“ Zunächst die langsamste Geschwindigkeit: 5 Millimeter pro Sekunde, dann Schritt für Schritt schneller bis auf 90 Millimeter pro Sekunde.

**PROGRAMMIERTE FAHRT**

Ruckelfrei setzt sich der Schlepptwagen in Bewegung. Die rote Struktur drückt er sofort gegen die Eiskante, sie leistet spürbar Widerstand. Eine mächtige Spannung baut sich auf, die den ganzen Schubwagen erfasst. Dann ein explosionsartiger Ruck, laut entlädt sich die Spannung, der Wagen wackelt befreit. Die Struktur ist sichtbar einige Zentimeter nach vorne geschneilt, hat dabei das Eis gecrusht. Brechen ist viel zu harmlos für diese höllische Kraftentladung. Zerquetschen ist trefender. Gesa Ziemer spricht vom „Kraftauslass“.

Schon baut sich die nächste Kraftkurve auf – und entlädt sich mit dem nächsten Donnerhall. In unregelmäßigen Abständen lassen die Entladungen den Schubwagen erzittern. Gebanntes Starren auf die rote Struktur, die unter Stöhnen und Ächzen das Eis zermalmt. Nun verdoppelt der PC das Tempo auf 10 Millimeter pro Sekunde. Die Abstände zwischen den Kraftentladungen werden geringer, die Entladungen weniger massiv. Das Stakkato der Schläge scheint sich in einen Takt fügen zu wollen, doch das Ohr findet nicht die Regelmäßigkeit. Noch nicht.

Nach der nächsten Temposteigerung sind die Entladungen schon recht häufig, aber dennoch unregelmäßig. Als würden sich verschiedene Taktfrequenzen überlagern, kurz harmonieren



**SICHTPROBE.** Nis Schnoor inspiziert die Eisqualität.

→ die Ergebnisse einer oft über Monate dauernden Forschung vergleichbar;

Gutes Eis erfordert Geduld. Es wächst pro Stunde um zwei Millimeter. Die acht Zentimeter brauchen also 40 Stunden. Jeder neue Testaufbau dauert einschließlich Auftauen des Alteises rund zwei Tage. Vorab lässt sich nie genau sagen, wie viele Fahrten im neu gewachsenen Eis möglich sind. Einige Tests crushen nur wenige Stellen der 78 Meter langen Eisfläche, andere fresen sich womöglich durch 30 Meter auf einmal. Wenn die erforderliche Eisdicke erreicht ist, taut Schnoor das Eis an und regelt die Temperatur von minus 18 auf plus 4 Grad hoch. Jetzt kann er den Folienvorhang zum Trimm-tank lüften, in dem die ganze Zeit schon vier Grad über null geherrscht haben.

Vor und nach jeder Testfahrt sagt Nis Schnoor neben der Teststrecke einen Block von rund 30 mal 20 Zentimetern aus dem Eis. Im Eislabor schneidet er die Blöcke auf ein exakt vorgegebenes Maß und unterzieht sie einem maschinellen Drucktest. „Damit dokumentieren wir, dass unser Eis tatsächlich so gut ist wie gefordert.“ Schließlich müssen die Forschungsergebnisse auch in anderen Eistanks der Welt reproduzierbar sein. Messingenieur Mario Dalley notiert das Ergebnis des Drucktests und signalisiert, dass der Testlauf beginnen kann.

**Aufwand:** Insgesamt waren für das Forschungsprojekt 50 Testfahrten nötig, zwölf Mal hat die Crew die identische Eisqualität neu wachsen lassen müssen.



**NATUR.** In der Realität sind die Strukturen der Windenergieanlagen enormen Belastungen ausgesetzt.

FOTO: EIKR/WJT - STOCK.adobe.com



**EISWUCHS.** Es dauert rund 40 Stunden, um in der Versuchsanlage eine acht Zentimeter dicke Eisschicht zu generieren.

und bald wieder auseinanderdriften. Es dröhnt und vibriert wuchtig durch die Halle des Eistanks. Es klingt wie ein Freejazz-Schlagzeugsolo. Der Drummer scheint einem inneren Rhythmus zu folgen, legt einen zweiten disharmonisch darüber, der Zuhörer erwartet, dass die schneller werdenden Rhythmen sich vereinen.

Doch erst mit steigendem Tempo – inzwischen sind wir bei 50 Millimeter pro Sekunde – schleicht sich der gleichmäßige Takt ein. Endlich kann sich das Ohr auf eine Konstante verlassen. „Jetzt beginnt das Frequenz-Lock-in, die Struktur erreicht ihre Eigenfrequenz“, ruft Gesa Ziemer. Die Wucht jedes einzelnen Kraftauslasses hat weiter abgenommen, dennoch schaukelt sich der regelmäßige Takt von fünf Schlägen pro Sekunde spürbar hoch; Das Vibrieren des Schlepptwagens wächst in der Magengegend, als würde ein DJ die Bässe lauter drehen. Bis ein gewisses Niveau erreicht ist. Intensiver wird das Wummern im Bauch nicht.

Ab etwa 90 Millimeter pro Sekunde gleitet die Struktur scheinbar mühelos durchs Eis. Fast geräuschlos bricht sie das Eis und schiebt einen steten Strom von Eiskrümeln vor sich hoch. Nach rund 40 Metern Crashfahrt durch das künstliche Eis kommt der Schlepptwagen zum Halt. Gesa Ziemer nickt zufrieden in die Runde. Mit dieser abschließenden Testfahrt hat sie nachgewiesen,

dass die rot lackierte Aluminiumstruktur richtig berechnet war: „Wir wollten vorhersagen, bei welchen Geschwindigkeiten es für die Struktur kritisch wird.“ Ihre Prognose hat sich bestätigt.

„Es sind die langsamen Tempi, die der Struktur sehr große Probleme bereiten. Dabei bauen sich über einen langen Zeitraum hohe Spannungen auf, die sich eruptiv entladen.“ Solchen Extrembelastungen könne man begegnen, indem auf Höhe des Meeresspiegels rund um den Monopile ein Konus geschweißt werde. „Dann schiebt sich das Eis an der Schräge hoch, und eine Teil des Drucks wird in Biegebruch umgelenkt.“ Der zweite Problembereich ist das Frequenz-Lock-in. „Jede Struktur hat ihre ganz spezielle Eigenfrequenz“, sagt sie. „Allerdings können wir eine Struktur verstimmen, etwa durch einen größeren Durchmesser des Monopiles oder die Veränderung der Länge.“

Insgesamt hat das Forschungsprojekt vier Jahre gedauert. Der Aufwand hat sich gelohnt – die sechs Partner aus der Offshore-Industrie haben nun eine Berechnungsgrundlage für ihre Monopiles.

**Eigentümer:** Neben dem größten Anteilseigner, dem DNV GL, der knapp 25 Prozent hält, sind viele weitere VSM-Mitglieder Miteigentümer der HSVA.

English abstract see page 40



[www.hsva.de](http://www.hsva.de)  
Die Hamburger Schiffbau-Versuchsanstalt HSVA ist eine private Forschungseinrichtung, die von zahlreichen maritimen Unternehmen getragen wird.