

Gutachten Nr. A8232 / 05

Kurzfassung

zur Ermittlung der Schadensursache der am 25./26.11.2005 im westlichen Münsterland geschädigten Stahlgittermaste des Hoch- und Mittelspannungsnetzes

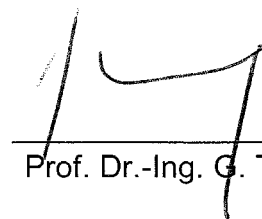
Auftraggeber: RWE Westfalen-Weser-Ems AG
Freistuhl 7
44137 Dortmund

Das vorliegende Gutachten umfasst:
Seite 1 bis 22

Essen, 13.02.2006



Dr.-Ing. C. Ebenau
(Sachbearbeiter)



Prof. Dr.-Ing. G. Thierauf

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Aufgabenstellung	3
2 Schadensumfang	4
3 Untersuchung der Belastungen (Eis, Schnee, Wind) zum Zeitpunkt des Schadens	4
3.1 Wetterlage	4
3.2 Bildung der Schneeanhaftungen an den Seilen der Hochspannungsfreileitungen	6
3.3 Abschätzung von Durchmesser und Gewicht der Schneeanhaftungen	7
3.4 Nachrechnung des Gewichts der Schneeanhaftungen unter Auswertung des beobachteten Leitungsdurchhangs und des Seilversagens an einer Leitung	8
3.5 Abschätzung der aufgetretenen Zusatzlasten aus Schneeanhaftungen ...	10
4 Prüfung der Standsicherheitsnachweise und Nachrechnung repräsentativer Masttypen unter normgemäßer Belastung	11
5 Statisch-konstruktive Prüfung repräsentativer Masttypen unter Ansatz der am Schadenstag vorhandenen Belastung	13
6 Materialuntersuchungen an geschädigten Masten	15
6.1 Stickstoff-Alterung	15
6.2 Labortechnische Materialuntersuchungen	16
6.3 Ortsbesichtigungen	18
7 Zusammenfassung	19
8 Normen, Literatur und vorliegende Dokumente	21

1 Aufgabenstellung

Gegenstand dieses Gutachtens ist die Ermittlung der Ursache für Schäden an Stahlgittermasten der Hochspannungsfreileitungen (110 kV) Alstätte-Vreden, Gronau-Coesfeld, Gronau-Metelen, Metelen-Roxel und Ortseinführung Stadtlohn. Hierzu werden Materialproben aus den betroffenen Strommasten untersucht sowie die technischen Unterlagen der Maste geprüft. Anhand einer Abschätzung der aus den klimatischen Bedingungen resultierenden Belastungen der Leitungsseile durch Schnee- und Eisanhaftungen und darauf wirkende Windkräfte wurde eine statisch-konstruktive Prüfung der Standsicherheit repräsentativer Masttypen durchgeführt.

Durch die erheblichen Schneefälle bei Temperaturen um 0°C und kräftigem Wind kam es am 25./26.11.2005 im westlichen Münsterland zu extrem schweren Ablagerungen an den Leiterseilen von Freileitungen. Als Folge wurden insgesamt 83 Stahlgittermaste von Hochspannungsfreileitungen in den Kreisen Borken und Steinfurt stark beschädigt bzw. versagten total. Die erheblichen Schäden am 110 kV-Hochspannungsnetz führten zu Stromausfällen. Auch auf der Mittelspannungsebene wurden zahlreiche Leitungen beschädigt.

Bei der Ermittlung der Schadensursachen wird insbesondere folgenden Fragen nachgegangen:

- Entspricht das Material, die Tragfähigkeit und die Statik der Strommaste den technischen Baubestimmungen zum Zeitpunkt der Errichtung,
- Hat sich aufgrund des Alters der Strommaste und dadurch bedingter Materialermüdungserscheinungen oder anderer Umstände, wie z.B. Korrosion oder Stahlversprödung eine Reduktion der Standfestigkeit der Maste ergeben,
- Hätten Maste moderner Bauart, die nach heute gültigen technischen Baubestimmungen errichtet wurden, den Belastungen standgehalten.

Wegen des uneinheitlichen Leitungsbestandes und der geringeren Bedeutung für die Versorgungssicherheit sowie der unterschiedlichen Schadensbilder ist das Mittelspannungsnetz gesondert zu betrachten. Prinzipiell kann von den selben Belastungsansätzen wie beim Hochspannungsnetz ausgegangen werden.

2 Schadensumfang

Am 25. und 26.11.2005 kam es zu vielfältigen Schäden an Versorgungsleitungen. An fünf Hochspannungsfreileitungen (110 kV) kam es zu Beschädigungen bzw. zum Totalversagen von 83 Stahlgittermasten. Von den Schäden betroffen sind vorwiegend Maste der Baujahre 1950, 1951, 1960, 1984 und 1990/91.

Von dem Schadensereignis sind nur nordwestlich – südöstlich verlaufende Leitungen betroffen. Die Windrichtung vor und während des Schadensereignisses lag zwischen Süd und Südwest ($190^\circ - 220^\circ$) und damit nahezu senkrecht zu den betroffenen Leitungen (Bild 1).

Die Schäden führten zu Versorgungsausfällen im Münsterland. Zur Behebung der Störung wurden in großem Umfang provisorische Maste und Portale errichtet.

3 Untersuchung der Belastungen (Eis, Schnee, Wind) zum Zeitpunkt des Schadens

3.1 Wetterlage

Schneetief „Thorsten“ führte von Freitag Nachmittag (25.11.2005) bis Sonnabend (26.11.2005) vor allem in einem Streifen vom Weser- und Wiehengebirge über das nördliche Münsterland und den Niederrhein bis zu den Niederlanden zu Schneefällen in selten beobachteter Höhe und traf damit Gebiete, die gewöhnlich keine hohen Schneemassen verzeichnen [10]. Besonders viel Schnee fiel im Raum Münster-Osnabrück. Die Wetterstation am Flughafen Münster-Osnabrück bei Greven registrierte am Samstag Morgen eine Schneehöhe von 25 cm ^{*1}. Die Station in Legden gibt für den Zeitraum 25. bis 26.11.2005 (jeweils 7⁰⁰ Uhr) sogar eine Neuschneehöhe von 35 cm an [1]. Der Vergleich zu den absolut höchsten, je in der Münsterländischen Bucht gemessenen Schneehöhen, zeigt, dass es sich

^{*1} Üblicherweise fällt im Münsterland nicht mehr als 5 bis 10 cm Schnee in 24 Stunden.

bei diesen Schneemengen um ein ungewöhnliches Ereignis handelte. Sie betragen in Münster 38 cm (am 28.1.1897), in Bad Salzuflen und Kalkar 48 bzw. 35 cm (jeweils am 18.2.1968) und in Bückeburg bei Minden 34 cm (am 12.1.1985) [10]. Bei diesen historischen Werten handelt es sich jedoch um Maximalhöhen, die sich auch über einen längeren Zeitraum summiert haben können.



Bild 1: Lage der geschädigten Strommaste 110 kV in den Kreisen Borken und Steinfurt.

Diese Schneemassen führten zu katastrophalen Bedingungen für den Straßen- und Schienenverkehr sowie für das Stromversorgungsnetz. Ursache hierfür waren nicht nur die absoluten Schneemengen, sondern auch die Witterungsbedingungen, unter denen der Schnee fiel. So lagen die Temperaturen während des Schneefalls kaum unter 0 °C, teilweise sogar etwas darüber. Dadurch war der Schnee nass, so dass er gut an Bäumen, Stahlkonstruktionen und Drähten haftete. Es herrschte außerdem kräftiger Wind, wodurch die Anlagerung von Schnee an Hindernissen, Bäumen und Überlandleitungen verstärkt wurde.

Die maximalen Böen-Windgeschwindigkeiten lagen am Nachmittag des 25.11.2005 an drei Messstationen des deutschen Wetterdienstes aus der Umgebung des Schadensgebiets bei 15 bis 20 m/s (Beaufort 6 bis 7, in Böen 8). Die Windrichtung lag zwischen Süd und Südwest, die Temperatur zwischen -0,2 und 1,0°C.

3.2 Bildung der Schneeanhaftungen an den Seilen der Hochspannungsfreileitungen

Zur Klärung des Phänomens der großvolumigen Anhaftungen an den Seilen wurden Fachgutachten von Prof. Zellner, Universität Duisburg-Essen [22] und vom Deutschen Wetterdienst Potsdam [1] eingeholt. Beide Gutachten kommen unabhängig voneinander zu der Aussage, dass es sich bei den Anhaftungen um mehr oder weniger komprimierten bzw. gepackten Nassschnee gehandelt hat. Für die Dichte von Schnee wird ein relativ großer möglicher Bereich zwischen 100 bis 400 kg/m³ [22] bzw. 100 bis 600 kg/m³ [1] angegeben. Beide Gutachten halten aufgrund der geschätzten Komprimierung der Schneeanhaftungen an den Leiterseilen eine Dichte von 300 kg/m³ \triangleq 0,3 g/cm³ für einen realistischen Wert zur Bestimmung der Zusatzlasten an den Seilen. Hierbei dürfte der starke Wind eine bedeutende Rolle gespielt haben, der für eine hohe Aufprallgeschwindigkeit der Schneeflocken verantwortlich war und somit zu einer hohen mechanischen Verdichtung der Schneeanhaftungen beigetragen hat. Bei einer maximalen Böengeschwindigkeit von 18 m/s entsteht ein Staudruck von 0,2 kN/m². Die Komprimierung der Schneeanhaftungen ist also mit einer Neuschneedecke vergleichbar, die mit einem Gewicht von 20 kg/m² beschwert wird.

Damit große Schneemengen an den Seilen haften bleiben und nicht durch ihr Eigengewicht zu Boden fallen, ist eine besonders haftfähige Konsistenz des Neuschnees erforderlich.

Nur durch den starken Wind lässt sich ein ausreichender Massenfluss erklären, der für den Aufbau der extrem schweren Schneeanhaftungen erforderlich ist. Durch den starken Wind, der mit ca. 10 m/s mittlerer Geschwindigkeit aufgetreten

ist, ändert sich der Massenfluss entscheidend und vergrößert sich im Verhältnis der Windgeschwindigkeit zur vertikalen Fallgeschwindigkeit des Schnees. Die Angaben zur durchschnittlichen vertikalen Fallgeschwindigkeit einer Schneeflocke variieren zwischen 0,2 m/s und 1,0 m/s dementsprechend wird der Massenfluss auf das 10- bis 50-fache erhöht. Damit ist die Bildung der beobachteten Schneeanhaftungen an Freileitungen innerhalb weniger Stunden möglich. Demgegenüber kann die in der DIN 1055-5 vorgesehene Regelschneelast von $0,65 \text{ kN/m}^2$ [2] auf den Boden und flache Bauteile nur erreicht werden, wenn sich die Niederschläge über einen längeren Zeitraum aufsummieren.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sich allein bei den ergiebigen Schneefällen um ein „Jahrhundert-Ereignis“ handelte. Diese waren zudem mit Temperaturen um 0°C , die zu einer hohen Haftfähigkeit der Schneemassen führten, und starkem Wind gekoppelt. Nur durch das Zusammentreffen dieser drei Wetterbedingungen konnten sich die beobachteten enormen Schneeanhaftungen an den Leiterseilen bilden.

3.3 Abschätzung von Durchmesser und Gewicht der Schneeanhaftungen

Exakte Messwerte der aufgetretenen Durchmesser und Gewichte der Schneeanhaftungen während des Schadensgeschehens liegen nicht vor. Zur Bestimmung des Durchmessers der an den Stromleitungen anhaftenden Schneemantelungen wurden zwei Photographien durch einen öffentlich bestellten Vermessungsingenieur ausgewertet [13]. Er konnte Durchmesser der Schneemantelungen von ca. 17 cm nachweisen. Die ermittelten Durchmesser liegen auch dem Gutachten des DWD Potsdam [1] zu Grunde, der unter deren Berücksichtigung eine „bestmögliche Abschätzung“ des Durchmessers der Schneeanhaftungen von $15 \pm 3 \text{ cm}$ trifft.

Aus dem Durchmesser und der geschätzten Dichte des Schnees lassen sich die an den Leiterseilen aufgetretenen Zusatzlasten abschätzen, wobei bezüglich der Durchmesser eine gewisse Bandbreite berücksichtigt wird. Unter Annahme einer Schneedichte von 300 kg/m^3 und eines Gesamtdurchmessers von 170 mm

errechnet sich eine Zusatzlast von 67 N/m (\cong 6,8 kg/m), für eine vorsichtige Abschätzung des Gesamtdurchmesser mit 150 mm errechnet sich die Zusatzlast mit 52 N/m (\cong 5,3 kg/m) und für einen Gesamtdurchmesser von 210 mm errechnet sich eine Zusatzlast von 103 N/m (\cong 10,5 kg/m), die nach Ansicht des Gutachters einen realistischen Grenzwert darstellt.

3.4 Nachrechnung des Gewichts der Schneeanhaftungen unter Auswertung des beobachteten Leitungsdurchhangs und des Seilversagens an einer Leitung

Ein rechnerischer Nachweis des Gewichts der anhaftenden Schneemassen ist aus dem an vielen Leitungen beobachteten großen Durchhang (z.B. Bild 2) möglich. Grundsätzlich kann bei bekanntem Seildurchhang das anhaftende Schneegewicht rechnerisch ermittelt werden. Hierzu wurden drei Leitungsfelder, bei denen der Durchhang unter Schneelast dokumentiert war, betrachtet. Bereits geringe Änderungen der Seillänge können eine signifikante Änderung des Durchhangs bewirken. Daher wurde bei der Nachrechnung der Seile auch die Schrägstellung der Isolatorketten berücksichtigt, die sich bei feldweise unterschiedlicher Zusatzlast



Bild 2: Durch Schnee- und Eislasten tief hängende Hochspannungsleitungen, BL1503 Gronau – Coesfeld (110 kV), östlich von Legden, 28.11.2005.

an den Seilen ergeben kann. Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass ein durchschnittliches Eisgewicht von 6,6 bis 7,6 kg/m auf die Seile wirkte, bevor diese die Geländeoberfläche berührten. Die Seile befinden sich hierbei in einem elastischen Zustand. Aus den Vermessungsergebnissen geht hervor, dass die Seile nach dem Abfall der Schneelasten wieder in Ihren ursprünglichen Zustand zurückgegangen sind.

In einer weiteren Vergleichsrechnung wird die Eislast zum Zeitpunkt des Erreichens der Bruchlast, für das Erdseil der Strecke BL 4307 (Seil Typ 240/40), ermittelt. Bei diesem Streckenabschnitt waren die Aluminiumlitzen des Erdseils an mehreren Tragmasten an der Klemme gerissen (Bild 3). Ein ca. 40 m langes Teilstück des Seils wurde ausgebaut und die Bruchlast für dieses Seil in Versuchen zu $S_{Br} = 85,8 \text{ kN}$ ermittelt [12]. Die Nachrechnung ergab, dass unter einer Schneelast von $p_{Br} = 10,3 \text{ kg/m}$ die Bruchlast von $S_{Br} = 86 \text{ kN}$ erreicht wird. Diese Belastung stellt einen realistischen Grenzwert der aufgetretenen Zusatzlasten dar.



Bild 3: Durch Schneelasten gerissene Aluminiumlitzen des Erdseils, BL4307
Hanekenfähr – Gersteinwerk (380 kV), Mast Nr. 132, 08.01.2006.

3.5 Abschätzung der aufgetretenen Zusatzlasten aus Schneeanhaftungen

Bei dem am 25./26.11.2005 im Münsterland aufgetretenen Schaden mit den beobachteten extremen Schneeanhaftungen handelt es sich um ein sehr außergewöhnliches Ereignis, welches in NRW bisher noch nicht beobachtet wurde. Nur die ungünstige Kombination von außergewöhnlich ergiebigen Schneefällen bei starkem Wind und Temperaturen um 0°C sowie die hohe Haftfähigkeit der Schneemassen führten zu der extremen Belastung der Hoch- und Mittelspannungsfreileitungen.

Die aktuell für Hochspannungsfreileitungen gültige DIN EN 50341 [9] gibt auf Eisansätzen basierende Zusatzlasten vor und auch in der für allgemeinen Hochbau gültigen neuen DIN 1055-5 [2], die für Hochspannungsfreileitungen nicht anzuwenden ist, jedoch den aktuellsten Stand des Wissens zu Schnee- und Eislasten beinhaltet, beschränken sich die Lastangaben auf Klareis und Raueisfahnen. Schneeanhaftungen, wie hier aufgetreten, werden in der aktuellen Normung nicht berücksichtigt, was die Außergewöhnlichkeit der aufgetretenen Lastsituation unterstreicht.

In Tabelle 1 werden die Werte für Zusatzlasten aus Eisbehang aus unterschiedlichen Normen mit der aufgetretenen Belastung durch Schneeanhaftungen verglichen. Für den Bau und Betrieb der bei diesem Schadensfall betroffenen Hochspannungsleitungen war die VDE 0210 in der Fassung von 1951 [19] oder 1954 [20] bzw. 1985 [21] gültig. Die darin vorgegebenen Werte (entsprechend Eislastzone I der neueren Normen) wurden bei dem vorliegenden Schadensfall auf das 6,3-bis 14,4-fache überschritten. Bei Bemessung neuer Leitungen nach der neuesten VDE 0210 (heute DIN EN 50341) [9], bei der unter Berücksichtigung des aufgetretenen Schadens und der Eiszonenkarte in [2] eine Einordnung in Eislastzone II erfolgen sollte, ergeben sich Zusatzlasten die durch die aufgetreten Lasten um den Faktor 3,6 bis 7,1 überschritten werden.

Aufgrund der Auswertung der Nachrechnung der Seildurchhänge und dem Seilriss des Erdseils der BL 4307 sowie unter Berücksichtigung des Gutachtens des DWD [1] wird für die statischen Berechnungen der betroffenen Maste mit vier unter-

Tabelle 1: Übersicht über Eis-/Schneemassen an einem Leitungsseil mit 22 mm Durchmesser nach Norm und bei diesem Schadensfall.

	Zusatzlast nach VDE 1951 [19] + 1954 [20]	Zusatzlast nach VDE 1985 [21]	Eiszone I nach VDE 2002 [9]	Eiszone II nach VDE 2002 [9]	Schneeanhaftungen bei diesem Schadensfall	
Durchmesser:	-	-	4,1	5,4	15 bis 21	cm
Dichte:	-	-	750	750	300 * ²)	kg/m ³
Schnee- / Eis- masse:	0,84	0,73	0,73	1,47	5,3 bis 10,5	kg/m

*²) entspricht dem Vorschlag des Deutschen Wetterdienstes Potsdam [1].

schiedlichen Schadensszenarien und einer durchschnittlichen Zusatzlast von 52 N/m ($\hat{=}$ 5,3 kg/m) ausgegangen. Dieser Wert ergibt sich bei Annahme eines Gesamtdurchmessers von 150 mm und einer Schneedichte von 300 kg/m³ und deckt sich auch mit den Zusatzlasten, die bei einem ähnlichem Schadensfall 1980 in Bayern nachgewiesen wurden [18]. Der Wert stellt eine konservative Abschätzung dar, für die mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass sie bei den beschädigten Hochspannungsfreileitungen mindestens erreicht wurde. Der Wert beinhaltet auch, dass die Schneemassen durch den Seildurchhang tendenziell in Richtung Feldmitte rutschen, sich hier größere und in den Seilbereichen nahe den Masten mit steiler Neigung geringere Lasten ergeben. In Teilbereichen können durchaus auch höhere Lasten aufgetreten sein.

4 Prüfung der Standsicherheitsnachweise und Nachrechnung repräsentativer Masttypen unter normgemäßer Belastung

Die statischen Berechnungen repräsentativer Masttypen (3 Trag- und 4 Abspannmaste) der betroffenen Leitungen wurden einer bautechnischen Prüfung unterzogen, um die Frage zu beantworten, ob die geschädigten Maste bezüglich der Standsicherheit den gesetzlichen, bzw. den technischen Vorschriften entsprechen. Baurechtlich ist eine statische Prüfung von Hochspannungsfreileitungsmasten nicht erforderlich, da die Maste nach dem Gesetz über die Elektrizitäts- und Gas-

versorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG, [11]) errichtet werden und damit nicht in die Zuständigkeit der Landesbauordnungen fallen.

Da die bisherigen Ausgaben der Errichtungsvorschrift für Hochspannungsfreileitungen (DIN/VDE 0210) den Bestandsschutz für Altanlagen einräumen, wird als maßgebende technische Vorschrift die zum Zeitpunkt der Errichtung des betreffenden Mastes gültige Fassung dieser Norm zu Grunde gelegt. Die tatsächlichen Windspannweiten und Leitungswinkel werden den Profilplänen der geschädigten Leitungen entnommen und in den statischen Berechnungen berücksichtigt. Die unabhängigen Vergleichsberechnungen erfolgen an dreidimensionalen Stabwerksmodellen. Diese Form der Modellierung und Berechnung war zum Zeitpunkt der Errichtung der betroffenen Maste nicht möglich bzw. nicht üblich.

Alle berechneten Tragmaste und die Winkelabspannmaste A4 02V – WA1, A4 02V – WA2 und A13V – WA3 M41 erfüllen alle statischen Nachweise unter normgemäßer Belastung. Der Abspannmast A26V – WA1 weist in der Vergleichsberechnung nach VDE 0210 / 12.85 für den 2/3-Lastfall, der den Charakter eines Ausnahmefalles hat, rechnerisch an zwei Bauteilen Ausnutzungen größer 1,0 auf. Betroffen sind die Knicknachweise der Diagonalen im Mastschaft direkt unterhalb des zweiten Horizontalverbandes und der Diagonalen direkt über den Mastfußpunkten („Hosenbeine“).

Ein Umbruch des Mastes infolge der Auslastung der Diagonalen mit Auslastung über 1,0 kann jedoch ausgeschlossen werden, da in dem statisch unbestimmten Tragwerk bis zum Erreichen der tatsächlichen Traglast Lastumlagerungen stattfinden können. Die Kraftumlagerungsmöglichkeiten werden deutlich, wenn man die Berechnung des Mastes ohne den vertikalen Füllstab über den Hosenbeinen durchführt. Die statischen Nachweise für die „Hosenbeine“ sind dann erfüllt. Zusätzlich wurde die Standsicherheit des Mastes unter Ausfall der Diagonalen mit einer Auslastung größer 1,0 im Mastschaft direkt unterhalb des zweiten Horizontalverbandes überprüft. Die Standsicherheit des Mastes kann dann auch für den 2/3-Lastfall nachgewiesen werden. Insofern weist der Mast eine normgemäße Standsicherheit auf.

Unter Berücksichtigung der zur Zeit der Errichtung der Maste gültigen technischen Vorschriften können als Ergebnis der Nachrechnung alle berechneten Maste als nicht umbruchgefährdet eingestuft werden.

5 Statisch-konstruktive Prüfung repräsentativer Masttypen unter Ansatz der am Schadenstag vorhandenen Belastung

Zur Beurteilung der Standsicherheit unter der am Schadenstag vorhandenen Belastung werden repräsentative Maste der betroffenen Hochspannungsfreileitungen statisch-konstruktiv überprüft. Bei der Berechnung der Lasten für die Schadensszenarien werden die folgenden Randbedingungen zu Grunde gelegt:

Schnee- / Eisdichte:	$\gamma_{\text{Eis}} = 300 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Tabelle 1)
Gesamtdurchmesser Leitung + Schnee / Eis:	$D_{\text{Gesamt}} = 15,0 \text{ cm}$
Staudruck aus Wind:	$q = 0,2 \text{ kN/m}^2$ ($\hat{=} 18 \text{ m/s}$):

Als mögliche Schadensszenarien werden sowohl erhöhte gleichmäßige Lasten als auch einseitig bzw. feldweise erhöhte Lasten berücksichtigt. Diese Annahme ist gerechtfertigt, weil die Eislast nicht über alle Leitungsfelder gleichmäßig entstanden ist, sondern einzelne Leitungsabschnitte unter voller Eislast und teilweise angrenzende Felder ohne Eislast waren (Bild 2). Die maximalen Auslastungen aus den Berechnungen unter Berücksichtigung der Schadensszenarien sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Als Ergebnis der Nachrechnungen werden jeweils die Auslastungen der Standsicherheitsnachweise bezogen auf die Widerstandsgrößen für den Lastfall Normalbelastung der jeweils zum Zeitpunkt der Errichtung der Maste gültigen DIN/VDE 0210 angegeben. Maste, die dem aktuellen Stand der technischen Baubestimmungen entsprechen, sind für klimatische Einwirkungen bemessen, die statistisch betrachtet einmal in 50 Jahren auftreten. Zusätzlich sind Sicherheits-

faktoren auf der Seite der Lastannahmen ($\gamma_F = 1,5$) und auf der Seite der Materialparameter ($\gamma_M = 1,1$) oder im alten Normenkonzept von ca. 1,7 in den zulässigen Spannungen vorhanden. Da die Baustoffe in der Regel zusätzliche Reserven beinhalten, ist ein Versagen intakter Freileitungsmaste erst bei einer wesentlichen Überschreitung der in den statischen Berechnungen angesetzten Bauteilwiderstände (Lastfall Normalbelastung) um mindestens den Faktor 2,0 zu erwarten.

Bei der Nachrechnung der Schadensszenarien ergeben sich erhebliche Überschreitungen in den Standsicherheitsnachweisen. Die Ausnutzungsgrade in den statischen Nachweisen liegen insbesondere bei den Abspannmasten jeweils bei mehreren Bauteilen weit über 2,0. Ein Versagen der Maste kann daher unter der am Schadenstag vorhandenen Belastung plausibel erklärt werden.

Tabelle 2: Maximale Auslastung in den Schadensszenarien.

Leitungstrasse	Baujahr	Mastart	maximale Auslastung
BL 1536 Gronau – Metelen	1951	A4 02V - T1	2,52
(BL 1520 Hervest-Dorsten – Stadtlohn)	1950	A4 02V - WA1	4,49
		A4 02V - WA2	3,87
BL 1503 Gronau – Coesfeld	1960 (verstärkt 2003)	A13V - T1 M42	2,01
		A13V - WA3 M41	4,56
BL 1525 Metelen – Roxel	1990 / 1991	A26V - T1	3,86
BL 1661 Alstätte – Vreden	1984	A26V - WA1	4,55

Die ohne Zweifel vorhandenen Zusatzbeanspruchungen in Folge von Eisabwürfen in einzelnen Leiterabschnitten würden die berechneten Überschreitungen weiter erhöhen. Zusammenfassend kann deshalb festgestellt werden, dass alle aufgetretenen Schäden allein durch die 6,3- bis 14,4-fache Überbelastung infolge der extremen Wettersituation zu erklären sind.

6 Materialuntersuchungen an geschädigten Masten

6.1 Stickstoff-Alterung

Erste Analysen bezüglich der Problematik der Stahlversprödung an Freileitungsmasten ergaben sich in den 1990er Jahren aus der in Augenscheinnahme schadhafter Maste. Die beobachteten Schäden ließen auf ein sprödes Versagen der Bauteile schließen. In der Folge wurden eine Vielzahl von Prüfungen an bestehenden Masten sowie an ausgetauschten Bauteilen betroffener Maste durchgeführt.

Stahlgittermaste für Hochspannungsfreileitungen werden, wie auch die meisten anderen Bauwerke aus Stahl, aus niedrig legierten Baustählen gefertigt. Die hierfür zugelassenen Materialien sind in der VDE 0210 in der jeweils gültigen Form festgelegt, die frühere DIN 17100 [4], heute DIN EN 10025 [6], regelte die Zulässigkeit chemischer Bestandteile. Bis in die 1960-er Jahre wurden niedrig legierte Baustähle mit zum Teil erhöhtem Stickstoffgehalt gefertigt und auch im Freileitungsbau eingesetzt, da sie dem damaligen Stand der Normung entsprachen.

Der teilweise hohe Stickstoffgehalt älterer Stähle ist durch das Thomas-Verfahren bedingt, bei dem Umgebungsluft in die Stahlschmelze geblasen wurde. Bei Zugbeanspruchungen im plastischen Werkstoffbereich und in höher beanspruchten Zugbereichen von Stahlkonstruktionen kann eine Stickstoffdiffusion entlang der Korngrenzen der Metallgitterstruktur stattfinden. Für diese Vorgänge wird eine ausreichende Zeit benötigt. Die Stickstoffdiffusion reduziert das plastische Verformungsvermögen des Stahles und bewirkt lokale Versprödungen. Dieser Vorgang kann im Mastgestänge nach einer extremen Beanspruchung durch äußere Lasten eingeleitet werden. Ähnliche Effekte der Materialversprödung können auch durch andere Stoffe in der Stahlzusammensetzung hervorgerufen werden.

Bei derart versprödeten Bauteilen besteht die Gefahr, dass ein Versagen von geschraubten und genieteten Anschlüssen unter Zugbeanspruchung vorzeitig eintritt. Diese Problematik besteht prinzipiell bei allen Stahlkonstruktionen und wird als Spröbruchverhalten beschrieben.

Ab Mitte der 1960er Jahre wurde das Produktionsverfahren geändert und zum Frischen nur noch reiner Sauerstoff verwendet. Der Stickstoffanteil im Stahl wurde gemäß DIN 17100 (Ausgabe 09.66) [4] auf 0,011 % (Stückanalyse) begrenzt.

Der Nachweis einer möglichen Traglastminderung von Mastbauteilen infolge von Stickstoff bedingter Stahlversprödung ist jedoch schwierig. Weder die chemische Zusammensetzung des Stahls, noch mechanische Kenngrößen (Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Kerbschlagbiegeversuch) lassen direkten Rückschluss auf die Tragfähigkeit eines Anschlusses eines möglicherweise versprödeten Bauteils zu. Aufschluss über die tatsächliche Tragfähigkeit von Bauteilen geben letztendlich nur Bauteilversuche, in denen die Bruchkraft eines Original-Anschlusses bestimmt wird.

Da sprödes Versagen von Bauteilen aus Stahlgittermasten nur bei Zugbelastung festgestellt wird, wurden ausschließlich Zugversuche durchgeführt. Als Prüflinge wurden Diagonalen und Eckstiele aus den geschädigten Masten verwendet. Hierbei wurde insbesondere der Anschlussbereich der Diagonalen an die Eckstiele und die Tragfähigkeit der dort befindlichen Löcher untersucht.

6.2 Labortechnische Materialuntersuchungen

Vor Ort wurden insgesamt über 90 Probestücke bzw. Bauteile, alle aus geschädigten Masten, entnommen. Für Materialuntersuchungen wurden Probestücke unmittelbar aus den geschädigten Bereichen der Maste ausgewählt. Außerdem wurden möglichst unbeschädigte Bauteile für Bauteil- bzw. Anschlussversuche aus dem Bereich unmittelbar ober- oder unterhalb der Versagensstelle entnommen. Mit den Materialuntersuchungen bezüglich chemischer Zusammensetzung, Stahlfestigkeit und -zähigkeit sowie mit der Durchführung von Bauteilversuchen zur Untersuchung der aufnehmbaren Zugkräfte der Diagonalstabanschlüsse und von Eckstielen wurde die Schweiß- und Lehrtechnische Versuchsanstalt Duisburg (SLV) beauftragt. Ziel der Untersuchungen war es, mögliche Materialfehler zu erkennen und insbesondere festzustellen, ob sich aufgrund des Alters der Strom-

maste und dadurch bedingter möglicher Stahlversprödung eine Reduktion der Standfestigkeit der Maste ergeben hat.

Über chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von Diagonalstäben aus 8 geschädigten Masten und von Eckstielen aus 11 geschädigten Masten liegen Berichte der SLV vor [14], [15], [17]. Außerdem wurde von den Probestücken der Bauteilversuche begleitend an 7 Proben die Zugfestigkeit und an 5 Proben die Kerbschlagarbeit untersucht. Nahezu alle untersuchten Materialproben (mit einer Ausnahme) erfüllten die Anforderungen der zum Zeitpunkt der Errichtung der Maste gültigen Normen.

Bei 11 Proben wurde nach Maßstab der heute gültigen Normen ein erhöhte Stickstoffgehalte festgestellt. Auch Schwefel und Phosphor wurde teilweise in nach heutigem Maßstab zu hohen Konzentrationen gefunden. Dies lässt jedoch keinen unmittelbaren Rückschluss auf eine mögliche Versprödung des Stahls zu.

Bei einem Schuss der Eckstiele eines Tragmastes (L80x8, Baujahr 1960) wurde die nach heute gültigen Normen erforderliche Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur nicht erreicht. Um zu untersuchen, ob die verminderte Kerbschlagarbeit dieser Eckstiel-Proben mit einer möglicherweise verminderten Tragfähigkeit korreliert, wurde ein Bauteilversuch an einem der Eckstiele durchgeführt. Hierbei zeigte sich jedoch keine signifikante Minderung der Bruchkraft im Versuch gegenüber der rechnerischen Tragfähigkeit und der Bruch erfolgte duktil. Auch bei einem Diagonalstab (L55x6, Baujahr 1951) wurde eine bei Raumtemperatur zu niedrige Kerbschlagarbeit festgestellt, in zwei Bauteilversuchen ergab sich jedoch eine ausreichende Tragfähigkeit in Höhe des 2,03- bzw. 2,13-fachen des rechnerisch zulässigen Wertes.

Aus den durchgeführten Bauteilversuchen lassen sich Angaben zur Tragfähigkeit ableiten, die als Grundlage für eine Beurteilung der Schäden dienen können [16], [17]. Bei 19 der 27 Bauteilversuche trat das Versagen durch Ab- oder Ausreißen der Winkelprofile ein, bei 6 Versuchen durch Abscheren der Schrauben bzw. Niete und bei 2 Versuchen wurde einer der beiden Niete abgeschert und das Ende der Diagonalen riss aus. Die erreichten Bruchlasten werden den rechnerisch zulässi-

gen Kräften der statischen Berechnungen im Lastfall „Normallasten“ gegenübergestellt. Der Quotient aus Bruchkraft und rechnerisch zulässiger Kraft stellt ein Maß für die Sicherheit dar, die die Bauteile bei normgerechter Beanspruchung aufgewiesen hätten.

Obwohl sich unter den Probestücken auch Verbindungen befinden, die beim Umstürzen der Maste oder beim nachfolgenden Zerkleinern und Umlagern mit schwerem Baugerät möglicherweise bereits vorgeschädigt waren, wird bei allen Bauteilversuchen ein ausreichendes Sicherheitsniveau von durchschnittlich 2,49 erreicht.

Für die Beurteilung einer möglichen Traglastminderung infolge Stickstoff bedingter Stahlversprödung sind nur die 19 Versuche aussagekräftig, bei denen das Versagen durch Ab- oder Ausreißen der Winkelprofile eintrat. Für diese ergibt sich ein Quotient aus Bruchkraft und rechnerisch zulässiger Kraft von durchschnittlich 2,52 mit einer Standardabweichung von 0,26. Auch bei zwei Proben, bei denen anhand der Bruchflächen ein zumindest teilweise sprödes Bruchverhalten diagnostiziert wurde, liegen die erzielten Bruchlasten auf gleichem Niveau wie bei den übrigen Versuchen und geben keinen Hinweis auf eine verminderte Tragfähigkeit infolge Versprödung. Aus wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen, bei denen eine zweiparametrische logarithmische Normalverteilung der 19 Versuchswerte unterstellt wird, errechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass der Quotient aus Bruchkraft und rechnerisch zulässiger Kraft Werte kleiner 1,0 annimmt und damit ein Versagen unter normgerechter Belastung eintritt, zu kleiner als 10^{-6} . Somit kann festgestellt werden, dass die Schäden nicht auf eine verminderte Tragfähigkeit der verwendeten Thomas-Stähle zurückgeführt werden können.

6.3 Ortsbesichtigungen

Die Ortsbesichtigung zahlreicher beschädigter Maste durch den Gutachter erfolgte auch in Hinsicht auf mögliche Korrosionsschäden und Abrostungen an den Tragkonstruktionen. Derartige Schäden konnten jedoch in keinem Fall festgestellt werden. Der an den Bruchstellen durch die abgeplatzte Beschichtung nach einigen Tagen entstehende oberflächliche Rost ist witterungsbedingt und kein Indiz für

einen mangelhaften technischen Zustand oder eine verminderte Tragfähigkeit der Maste.

Bei den Begehungen der beschädigten Maste wurden Abmessungen und Ausführungsdetails stichprobenhaft anhand der Werkstattpläne überprüft. Hierbei ergaben sich keine Abweichungen, die auf eine Verminderung der Tragfähigkeit der Maste hätten schließen lassen.

An keinem der betroffenen Maste konnten Schäden oder Abweichungen von den Planunterlagen festgestellt werden, die auf eine mangelhafte Unterhaltung oder Regelüberwachung durch den Betreiber schließen ließen.

7 Zusammenfassung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Gutachten zeigen, dass das Versagen der Stahlgitter-Strommaste der 110 kV Hochspannungsleitungen keinesfalls auf eine nicht ordnungsgemäße Beschaffenheit oder nicht ordnungsgemäße Bemessung oder Ausführung der Strommaste zurückzuführen ist.

Tatsächlich entstand infolge der extremen Wetterbedingungen am 25./26.11.2005 an den Starkstromfreileitungen eine außerordentliche Zusatzlast durch Schneeanhaftungen, welche die in den verschiedenen Ausgaben der VDE 0210 [5], [19], [20], [21] [9] als Grundlage der statischen Berechnungen vorgegebenen Eisgewichte um ein Mehrfaches überstieg. Gegenüber den zum Zeitpunkt der Errichtung der Maste gültigen Bemessungsvorschriften wurde die Zusatzlast durch Schneeanhaftungen um das 6,3- bis 14,4-fache überschritten. Unter diesen Belastungen hätten auch Maste moderner Bauart, die nach heute gültigen technischen Bestimmungen errichtet wurden, versagt. Der am Schadenstag vorhandene starke Wind war eine wesentliche notwendige klimatische Bedingung für die Bildung der extremen Schneeanhaftungen. Ausschlaggebend für das Versagen der Maste war der durch die extremen Schneeanhaftungen stark vergrößerte Leiterzug, ins-

besondere wenn er feldweise unterschiedlich auftrat und zu einer Torsionsbeanspruchung der Maste führte.

Die Prüfung der Standsicherheitsnachweise an sieben repräsentativen Trag- und Abspannmasten ergab, dass keiner der Maste unter Normbelastung versagt hätte.

Auch die Materialuntersuchungen zeigen, dass die untersuchten Stähle von Masten aus den fünf betroffenen Leitungstrassen im Wesentlichen den zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen Normen entsprechen. Für einige untersuchte Bauteile wurde ein im Vergleich zu heute gültigen Normen zu hoher Stickstoffanteil im Stahl festgestellt und für einen Eckstiel (Baujahr 1960) und einen Diagonalstab (Baujahr 1951) eine zu niedrige Kerbschlagarbeit. Durch die aussagekräftigeren Bauteilversuche konnte aber in beiden Fällen eine ausreichende Tragfähigkeit nachgewiesen werden.

Hinweise auf eine mögliche Materialversprödung als Schadensursache konnten nicht festgestellt werden. Es konnten keine Hinweise auf einen möglicherweise nicht ordnungsgemäßen technischen Zustand der Maste bzw. eine reduzierte Standsicherheit aufgrund des Alters der Maste gefunden werden. Korrosionsschäden wurden ebenfalls nicht festgestellt und sind als Schadensursache auszuschließen.

Schadensursache ist daher alleine die extreme Wetterlage mit den beobachteten Schneeanhaftungen, die zu den extrem großen Zusatzlasten an den Seilen der Hochspannungs-Freileitungen führte. Dieses Ereignis liegt außerhalb der Lastdefinitionen sowohl der für Hochspannungsfreileitungen gültigen VDE-Normen als auch der bauaufsichtlich eingeführten Normen des allgemeinen Hochbaus, die Belastungssituationen erfassen, welche statistisch einmal in 50 Jahren auftreten. Somit handelte es sich um ein außergewöhnliches Ereignis, welches in diesem Ausmaß in NRW bisher nicht beobachtet wurde.

8 Normen, Literatur und vorliegende Dokumente

- [1] Deutscher Wetterdienst: Amtliches Gutachten über die im Raum Münsterland (Nordrhein-Westfalen) aufgetretenen Schnee- und Eislasten vom 25. bis 28.11.2005.- Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima und Umweltberatung, Potsdam, 24.01.2006.
- [2] DIN 1055-5: Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 5: Schnee- und Eislasten.- Ausgabe Juli 2005.
- [3] DIN 4114: Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Ausgabe Juli 1952.
- [4] DIN 17100: Allgemeine Baustähle; Gütenorm, Ausgabe Sept. 1966.
- [5] DIN 57210: Vorschriften für den Bau von Starkstrom-Freileitungen.- Ersatz für VDE 0210, Ausgabe: Oktober 1947.
- [6] DIN EN 10025: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen; Technische Lieferbedingungen.- Ausgabe:1994-03.
- [7] DIN EN 50341-1: Freileitungen mit Nennspannungen über AC 45 kV - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Gemeinsame Festlegungen; (entspricht VDE 0210 Teil 1) Ausgabe: 2002-03.
- [8] DIN EN 50341-2: Freileitungen über AC 45 kV - Teil 2: Index der NNA (Nationale Normative Festlegungen); Ausgabe: 2002-11.
- [9] DIN EN 50341-3-4: Freileitungen über AC 45 kV - Teil 3: Nationale Normative Festlegungen (NNA); Ausgabe: 2002-03.
- [10] Engel, A.; Lefebvre, C. & G. Müller-Westermeier: Schneemassen zum ersten Adventwochenende 2005 in Nordwestdeutschland.- Deutscher Wetterdienst, http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/regen/Schnee_NWDeutschland_200511251.pdf, 28.11.2005.
- [11] Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz, EnWG) vom 24.04.1998, zuletzt geändert am 20.05.2003.
- [12] SAG Energieversorgungsleistungen GmbH, Versuchs- und Technologiezentrum, Pohlmann, H. & N. Knobel: Versuchsbericht Nr. 2006-013A – Zugversuche an Seilen aus dem Münsterland.- Langen, 12.01.2006.
- [13] Schildheuer, E.: Ermittlung und Berechnung von Daten (Anm. d. G.: Ermittlung der Abmessungen von Schneeanhaftungen an Leiterseilen aus 2 Photographien).- Prof. Dr.-Ing. Erich Schildheuer, Öffentlich bestellter Vermessungsingenieur, 20.01.2006.
- [14] Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV Duisburg: Werkstoffprüfbericht 2005-710-1118/1 - Untersuchung von Strommasten, Diagonalstreben von 6 Strommasten.- 20.12.2005.
- [15] Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV Duisburg: Werkstoffprüfbericht 2005-710-1118/2 - Untersuchung von Strommasten, Eckstiele von 7 Strommasten.- 24.01.2006.
- [16] Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV Duisburg: Werkstoffprüfbericht 2005-710-1118/3 - Untersuchung von Strommasten, Bauteilver-suche an Diagonalstreben und Eckstielen.- 24.01.2006.

- [17] Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV Duisburg: Werkstoffprüfbericht 2006-710-0055 - Untersuchung von Strommasten, Untersuchungen an Diagonalstreben und Eckstielen.- 13.02.2006.
- [18] TÜV Industrie Service GmbH: Schäden an Freileitungsmasten der 110 kV-Ebene in Bayern am 24.4.1980.- Untersuchungsbericht Nr. TÜV-IS-ATO-ka-06-2022, München, 20.01.2006.
- [19] VDE 0210n / 2.51: Vorschriften für den Bau von Starkstrom-Freileitungen.- Verband Deutscher Elektrotechniker, 2. Nachdruck 1952.
- [20] VDE 0210 / 5.54: Vorschriften für den Bau von Starkstrom-Freileitungen.- Verband Deutscher Elektrotechniker, Mai 1954.
- [21] VDE 0210 / 12.85: Bau von Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV.- Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE, Ausgabe Dezember 1985.
- [22] Zellner, R.: Schneelasten auf Stromleitungen im Münsterland im Zeitraum 25.-26.11.2005; Begutachtung aus physikalisch-chemischer Sicht.- Prof. Dr. Reinhard Zellner, Universität Duisburg-Essen, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, 18.01.2006.