

Ausbau des Mittellandkanals an der Brücke Sandkamp in Wolfsburg - Messtechnische Überwachung der Pfeilergründung an der Uferspundwand -

Dr.-Ing. C. Stoewahse (GGU)

Dipl.-Ing. E. Hartwig (VW AG)

Dipl.-Ing. R. Aselmeier (WNA Helmstedt)

Dr.-Ing. G. Tranel (Eriksen und Partner, Oldenburg)

1. Einleitung

Ende der fünfziger Jahre wurde in Wolfsburg über den Mittellandkanal (MLK) die Brücke Sandkamp in Höhe des VW-Werks gebaut. Bereits unmittelbar nach der Herstellung des Brückenüberbaus hatte sich der Mittelpfeiler um mehrere Zentimeter gesetzt. 2004 wurde der MLK im Bereich der Brücke ausgebaut. Das Südufer unmittelbar neben dem Mittelpfeiler wurde mit einer rückverankerten Spundwand ausgebaut. Während des Aushubs der Gewässersohle wurden erneut Setzungen am Mittelpfeiler sowie Verformungen der neuen Spundwand beobachtet. Zur Sicherung des Erdaufagers der Spundwand wurde der Aushub gestoppt. Der MLK war in diesem Bereich nur beschränkt befahrbar. 2009 sollte die volle Befahrbarkeit wieder hergestellt werden.

Der Brückenüberbau durfte hinsichtlich seiner Gebrauchstauglichkeit und auch Tragfähigkeit nur noch geringe Setzungen erfahren. Standsicherheits- und Verformungsrechnungen der Ufereinfassung und des Brückenpfeilers ergaben, dass bei weiterem Aushub des Kanals die Grenzwerte der noch zulässigen Setzungen eingehalten werden können. Die Setzungen der Brücke und die Verformungen der Uferspundwand wurden aushubbegleitend durch Setzungs- und Inklinometermessungen überwacht.

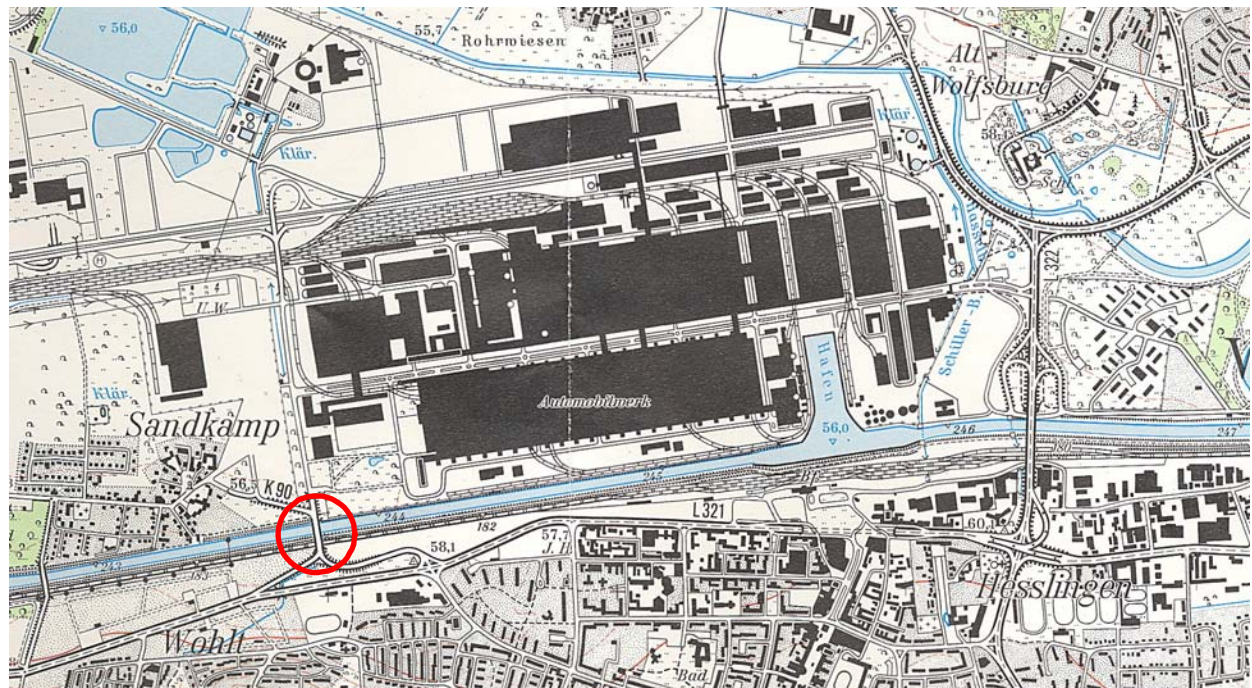


Abbildung 1: Übersichtslageplan

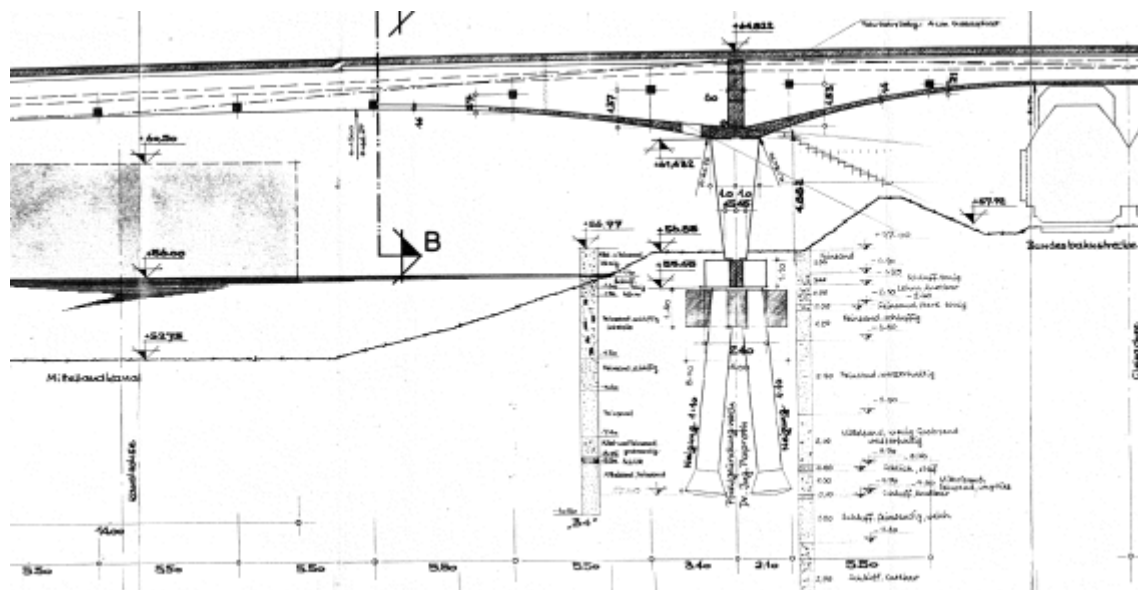


Abbildung 2: Querschnitt MLK und Pfeilergründung 1958

2. Baumaßnahme

Die Brücke 438 b „Sandkamp“ dient der Zufahrt zum VW-Werksgelände und quert den Mittellandkanal bei MLK-km 243,790 (Abbildung 1). Sie wurde 1958/59 gebaut.

Der Mittellandkanal war zu diesem Zeitpunkt als Muldenprofil mit Böschungsneigungen von 1:3 bis 1:4 ausgebaut. Der Mittelpfeiler und die Widerlager befinden sich hinter den Betriebswegen in ausreichendem Abstand vom Ufer. Etwa 10 m südlich des Mittelpfeilers verläuft die Bahnstrecke Berlin-Hannover (Abbildung 2).

Nach den Baugrunderkundungen aus dem Jahre 1958 wurden bis 5,6 m unter Gelände organisch durchsetzte, locker gelagerte schluffige Feinsande angetroffen. Darunter folgen bis 10,5 m unter GOK Feinsande, die bei 8 m durch eine dünne Schlickschicht unterbrochen werden.

Ausgehend von diesen Aufschlüssen wurde eine Pfahlgründung empfohlen. Am Mittelpfeiler teilen sich die Lasten auf vier Pfahlböcke auf, mit jeweils zwei Pfählen System Paproth mit Schaftdurchmessern von 95 cm und Fußdurchmessern von rd. 1,5 m. Die Pfahlköpfe sind durch einen Balken miteinander verbunden. Die Pfahlfüße befinden sich rd. 10,5 m unter Gelände auf 46,45 m NN. Je Pfahlbock wirkt eine Vertikallast von $V = 5610 \text{ kN}$.

Nach der Herstellung des Brückenüberbaus hatte sich der Mittelpfeiler um mehrere Zentimeter gesetzt. Ursache für diese Setzungen ist eine in den damaligen Baugrunderkundungen nicht erbohrte Schluffschicht von rd. 5 m Dicke, die unmittelbar unter der Pfahlfußebene beginnt und in der die Spitzendrücke nicht abgetragen werden konnten. Die Schluffschicht wurde erst 2005 durch Drucksondierungen festgestellt. Unter dem Schluff folgen dicht gelagerter Sand und in 21 m Tiefe halfester Ton.

Zur Entlastung der Pfahlfüße wurde 1959 direkt nach dem Auftreten der Setzungen der Kopfbalken mit vier Einzelplatten je 10 m^2 Grundfläche unterfangen. Der Kopfbalken wurde mittels Pressen angehoben und anschließend wurde der Zwischenraum zwischen Kopfbalken und Unterfangungskörper ausbetoniert. Etwa die Hälfte der Lasten sollte in die Flachgründung eingeleitet werden.

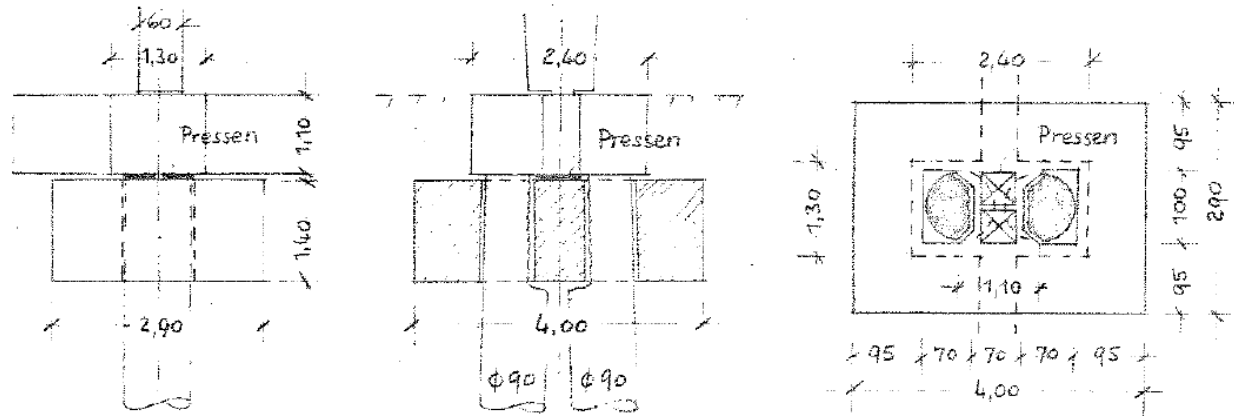


Abbildung 3: Unterfangung des Pfahlkopfbalkens

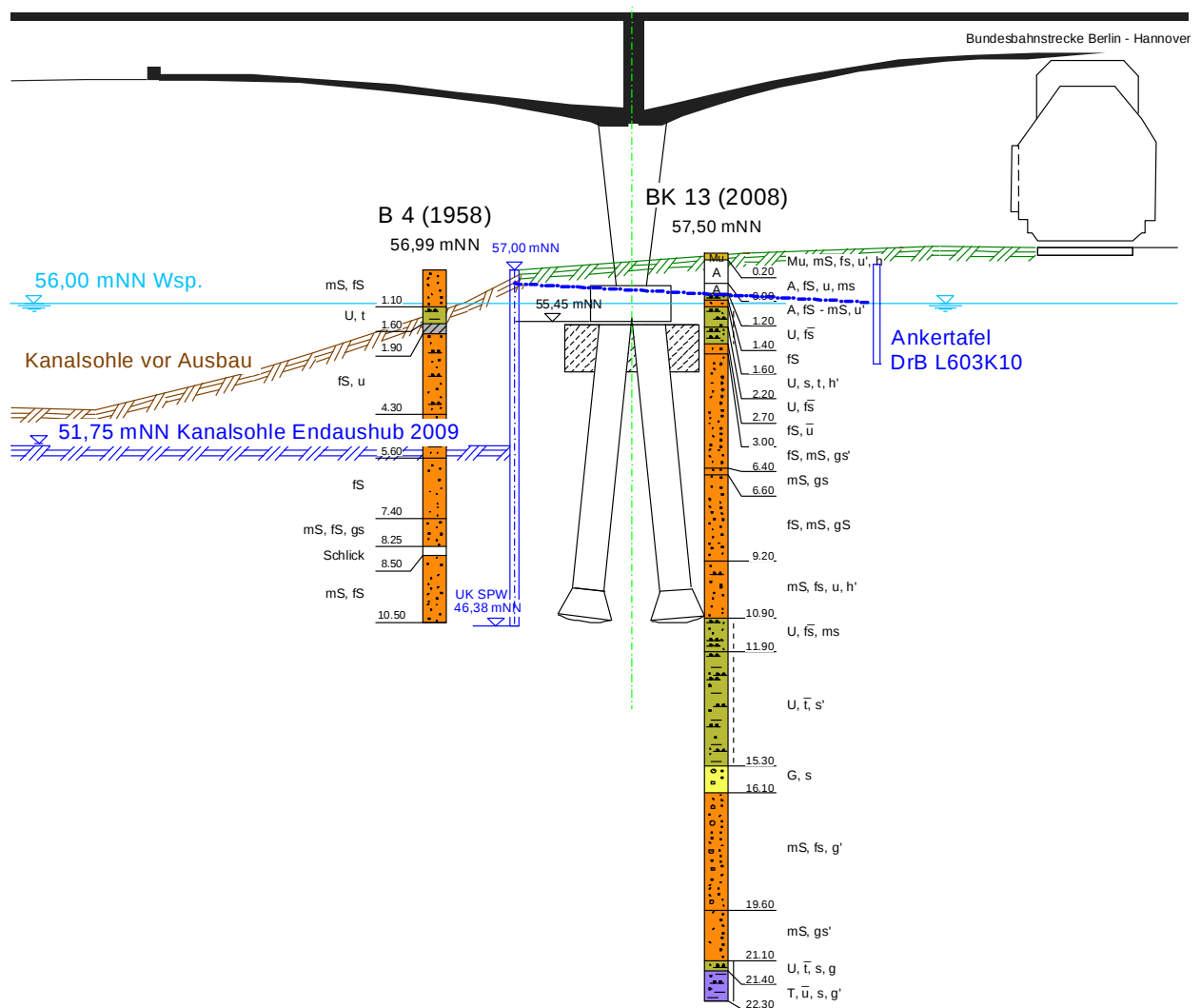


Abbildung 4: Pfeilergründung, Ufereinfassung und Baugrundaufbau

2004 wurde der MLK im Bereich der Brücke vom alten Muldenprofil zum KRT-Profil ausgebaut. Am Nordufer wurde eine 10,5 m lange Spundwand mit dem Profil Hoesch 2500 k eingepresst. Die Wand wurde durch Einstabanker $\varnothing$ 50 mm und Ankerplatten aus Spundbohlen Larssen 603 K rückverankert (Abbildung 4). Bei der Bemessung der Spundwand wurde noch von einer voll tragfähigen Pfahlgründung ausgegangen, so dass keine Lasten aus der Brücke bzw. dem Pfahlkopfbalken auf die Ufereinfassung wirken. Aus einbringtechnischen Gründen wurde jedoch ein stärkeres Spundwandprofil als nach dieser Bemessung erforderlich gewählt.

Während des Aushubs der Gewässersohle wurden erneut Setzungen am Mittelpfeiler sowie Durchbiegungen der Spundwand beobachtet. Zur Sicherung des Erdaufagers der Spundwand wurden die Aushubarbeiten im Kanal eingestellt und der Kanal war nur beschränkt befahrbar. In der nachfolgenden Abbildung ist der Setzungsverlauf der Höhenmessbolzen am Mittelpfeiler dargestellt.

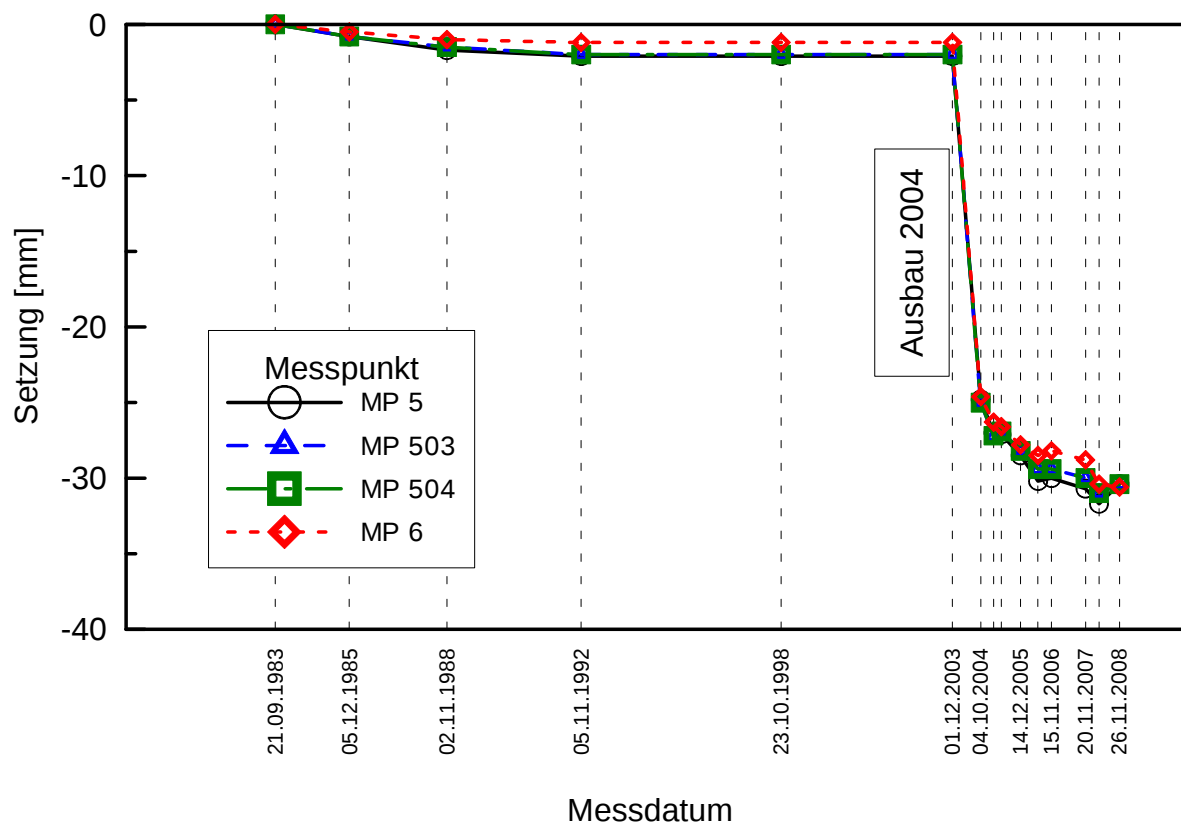


Abbildung 5: Setzungen des Mittelpfeilers

Die Setzungen des Mittelpfeilers wurden seit 1983 durch geodätische Messungen überwacht. Abbildung 5 zeigt den Setzungsverlauf. Bis zum Ausbau des Kanals ist ein deutliches Abklingen der Setzungen aus den Belastungen vor dem Ausbau des MLK zu erkennen. Mit den Aushubarbeiten zeigen sich erneute Setzungen von rd. 3 cm.

3. Lückenschluss und Sicherheitsanalyse

Voraussetzungen

Zur Herstellung der vollen Befahrbarkeit des Mittellandkanals im Bereich der Brücke Sandkamp war für 2009 der Endaushub der Gewässersohle geplant. Hierbei waren zwei Forderungen zu erfüllen:

- Die Standsicherheit der Ufereinfassung muss auch unter Ansatz der Lasten aus dem Pfahlkopfbalken vorhanden sein.
- Die Setzungen des Mittelpfeilers sind zu begrenzen.

Aus den statischen Nachrechnungen der Brücke durch das Ingenieurbüro Erikssen und Partner, Oldenburg, konnte noch eine maximale Zusatzsetzung am Mittelpfeiler von 2,8 cm toleriert werden. Ab einem Setzungsmaß von 1,0 cm war mit ersten Rissen im Brückenträger zu rechnen. Eine Sperrung der Brücke für den Verkehr war für den Betrieb des VW-Werks nicht möglich.

Standsicherheit der Ufereinfassung

Die Standsicherheit der Ufereinfassung war nach den derzeit gültigen Normen gemäß E 106 der EAU für folgende Lastfälle nachzuweisen.

Tabelle 1: Lastfälle Ufereinfassung

	Wasserstand MLK [m NN]	Grundwasserstand [m NN]
LF 1	55,75	56,00
LF 2	54,95	56,00
LF 3.2.a	54,00	56,00
LF 3.2.b	51,75	54,75

Die Kanalsohle liegt bei 51,75 m NN. In den Berechnungen wird ein Kolk vor der Spundwand von 50 cm berücksichtigt, so dass die Sohle auf 51,25 m NN angesetzt wird.

Aus der Brücke wird jede Stütze, bzw. jeder aus zwei Pfählen bestehende Pfahlbock mit einer Gesamtlast von $V_k = 5610 \text{ kN}$ belastet. Diese teilt sich auf in:

Ständige Last: $V_{g,k} = 4485 \text{ kN}$

Veränderliche Last: $V_{q,k} = 1125 \text{ kN}$

Ohne Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheiten ergibt sich nach DIN 1054:2005-01 für einen Bohrpfahl mit 95 cm Durchmesser und Fußverbreiterung eine Grenzlasterlast von $R_{1k} = 1504 \text{ kN}$. Das heißt, dass bei zwei Pfählen ein Anteil der ständigen Lasten von

$$\Delta V_{g,k} = V_{g,k} - 2 \cdot R_{1k} = 4485 \text{ kN} - 2 \cdot 1504 \text{ kN} = 1477 \text{ kN}$$

über den Kopfbalken bzw. die Unterfangungsplatten abgetragen werden muss. Die veränderlichen Lasten aus dem Oberbau $V_{q,k}$ werden vollständig über die Unterfangungsplatte in den Untergrund geleitet und belasten die Spundwand.

Die Standsicherheit der Spundwand konnte für alle Lastfälle nachgewiesen werden. Die größten Ausnutzungsgrade ergaben sich im Nachweis des Aufbruchs des Verankerungsbodens.

Verformungen

Zur Abschätzung der Verformungen der Ufereinfassung und der Brücke sowie zur Überprüfung der Einhaltung der oben genannten noch zulässigen Setzungen wurde das Gesamtsystem mit seiner Belastungsgeschichte in einem FE-Modell abgebildet. Vereinfachend wurde an einem ebenen Modell gerechnet. Das Netz für den Endaushubzustand ist in Abbildung 6 dargestellt. Folgende Phasen wurden modelliert:

1. Ausgangszustand
2. Aushub MLK
3. Herstellen Pfahlgründung
4. Lastaufbringung 1611 kN/m
5. Unterfangung herstellen

6. Unterfangung aktivieren
7. Unterfangung fixieren
8. Spundwand und Anker setzen
9. Ausbau MLK
10. Sanierungsvarianten:

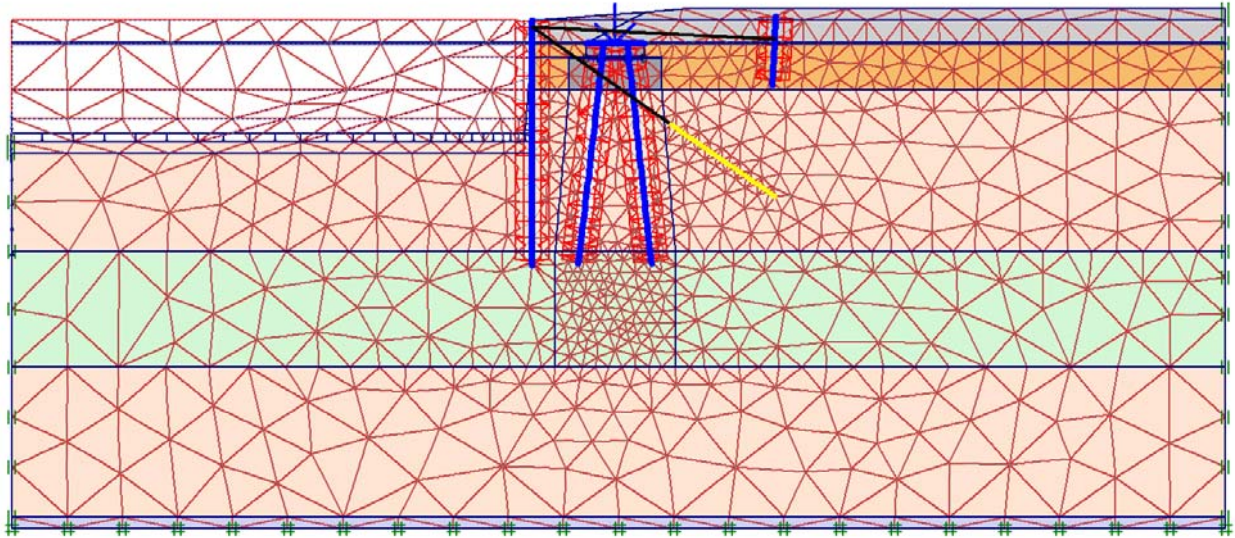


Abbildung 6: System im Endzustand

Die Verformungen des Systems konnten mit dem Modell gut abgebildet werden. Nach Lastaufbringung auf die Pfahlgründung ergaben sich rechnerische Setzungen von 12 cm. Bei Aktivierung der Unterfangung kommt es zu einer Lastumlagerung und die Spannungen unterhalb der Unterfangungsplatte erhöhen sich erwartungsgemäß. Die Kräfte an den Pfahlfüßen verringern sich jedoch kaum. Dieses ist auch am Normalkraftverlauf im Pfahl zu erkennen (Abbildung 7). Der Kraftverlauf nach Lastaufbringung ist in der Abbildung durch die durchgehende, schwarze Linie dargestellt. Nach Aktivierung der Unterfangung ergibt sich der durch die strich-punktierte, blaue Linie gekennzeichnete Verlauf.

Mit dem Aushub des Mittellandkanals werden die Lasten wieder verstärkt über die Pfähle abgetragen, da die Spannungsausbreitung unter der Flachgründung durch den Aushub verändert wird (gestrichelte, rote Linie). Es kommt zu neuerlichen Setzungen des Mittelpfeilers von etwa 2 cm. Das entspricht etwa den tatsächlich gemessenen Setzungen (s. Abbildung 5). Die Durchbiegung der Spundwand im Feldbereich ergab sich zu

etwa 10 mm. Dieses stimmt gut mit den Angaben des WNA Helmstedt überein, nach denen die Spundwandverformungen nach Aushub des Kanals 12 mm betrugen. In Abbildung 7 sind auch die Biegelinien der Spundwand dargestellt.

Abbildung 7: Biegelinien der Spundwand und Normalkraftverlauf in den Pfählen

Nachdem das Systemverhalten bis zu diesem Bauzustand gut nachgebildet werden konnte, wurden zur Verformungsprognose für den Endaushubzustand verschiedene Ertüchtigungsmaßnahmen für die Pfeilergründung untersucht:

- Injektion unter den Pfahlfüßen
- Injektion unter der Unterfangungsplatte
- Anwendung der Beobachtungsmethode
- Einbau einer zweiten Ankerlage

Bei den genannten Injektionsverfahren erwiesen sich die Bauzustände als kritisch, in denen nur eine verminderte Scherfestigkeit in den gerade injizierten Bereichen angesetzt werden konnte. Unter Berücksichtigung dieser Effekte ergaben sich rechnerisch zu große Setzungen, die mit den Vorgaben aus der Statik nicht vereinbar waren.

Ohne konstruktive Maßnahmen wurden die Setzungen des Mittelpfeilers zu 1,7 cm berechnet. Damit wären die statisch zulässigen Verformungen des Überbaus von maximal

2,8 cm noch eingehalten, Risse können aber auftreten. Auf Grundlage dieser Berechnungen und der oben beschriebenen statischen Nachweise der Spundwand wurde daher empfohlen, den Aushub der Gewässersohle durch Verformungsmessungen am Mittelpfeiler und an der Spundwand zu begleiten.

Die Spundwandberechnung ergab die höchsten Ausnutzungsgrade für die Ankerwand. Um ein Versagen dieses Traggliedes vollkommen auszuschließen und höhere Sicherheiten für das Gesamtsystem zu erhalten, wurde der Einbau einer zweiten Ankerlage vorgesehen. Die Verankerung erfolgte mit Dauer-Litzenankern. Die Anker sind unter 35° geneigt und 13,5 m lang. Die Länge des Verpresskörpers beträgt 5 m. Aus der Berechnung der Ufereinfassung ergab sich für die vorhandene Verankerung im LF 1 eine Ankerkraft von rd. 80 kN/lfd. m. Mit einer entsprechenden Kraft wurden die neuen Anker vorgespannt, so dass die alte Ankerlage weitgehend entlastet wurde. Die Ankerarbeiten wurden von der Fa. Stump Spezialtiefbau GmbH ausgeführt.

Durch die neue Ankerlage werden die Kopfverformungen der Spundwand beschränkt und auch die Verkipnungen und Setzungen der Pfahlkopfplatte reduziert. Das prognostizierte Setzungsmaß betrug noch 11 mm.

4. Messprogramm

Die Baggerarbeiten für den Lückenschluss an der Brücke Sandkamp wurden im Juni/Juli 2009 ausgeführt. Baubegleitend und nachlaufend wurden

- die Setzungen des Mittelpfeilers an den vorhandenen Höhenbolzen,
- die Kopfverschiebungen der Spundwand,
- die zusätzlichen Durchbiegungen der Spundwand.

überwacht.

Die Setzungen des Mittelpfeilers und die Verschiebungen des Spundwandkopfes wurden durch das laufende geodätische Messprogramm erfasst.

Die Horizontalverformungen wurden durch zwei Inklinometer überwacht, die östlich der Brücke außerhalb des nachverankerten Bereichs und in der Mittelachse der Brücke installiert wurden. Die Teufen der Inklinometerbohrungen betrugen 20,0 und 14,5 m.

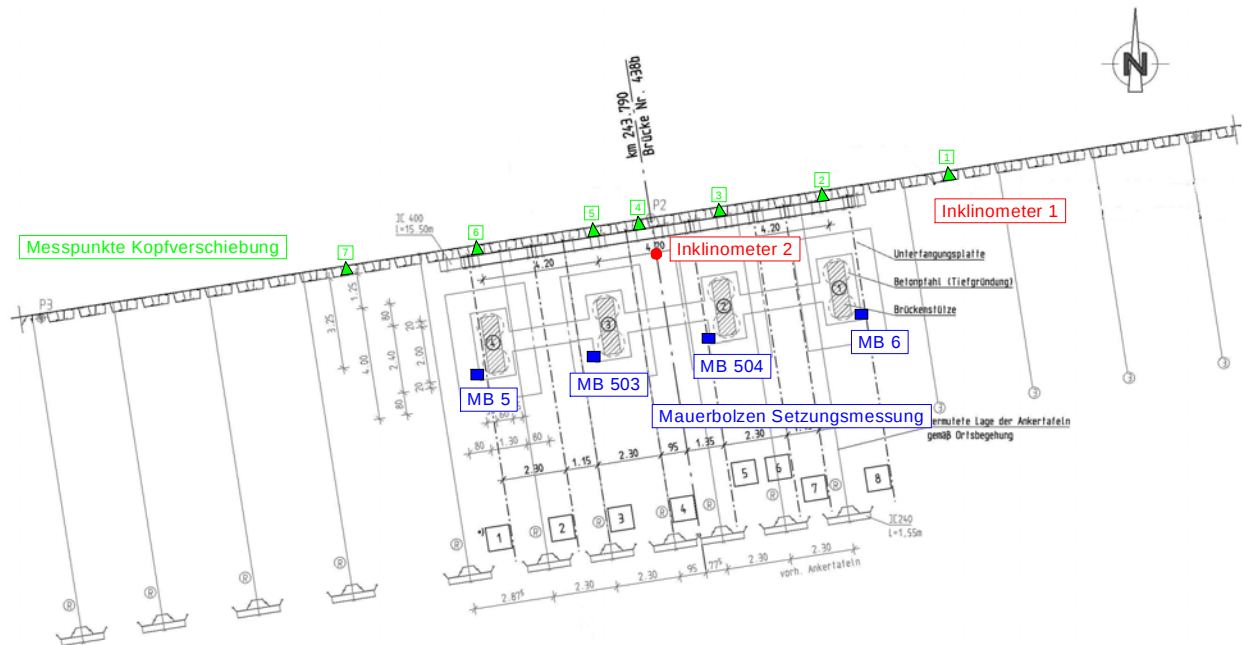


Abbildung 8: Lage der Messpunkte und der Inklinometerbohrungen

Für den Mittelpfeiler der Brücke kann nach Berechnungen des Ingenieurbüros Eriksen und Partner, Oldenburg, eine maximale Zusatzsetzung von ca. 2,8 cm toleriert werden. Ab einem Setzungsmaß von 1,0 cm ist mit ersten Rissen im Brückenträger zu rechnen.

Für die Überwachung der Aushubarbeiten wurden Melde- und Warnwerte für die Setzungen des Mittelpfeilers und die zugehörigen Kopfverschiebungen der Spundwand festgelegt. Beim Erreichen des Meldewertes war ein Baustopp vorgesehen, um zunächst die Brücke auf Risse bzw. den Verankerungsbereich auf Verformungen zu kontrollieren. Erst beim Erreichen der Warnwerte würden Maßnahmen wie die Sperrung der Brücke für den Schwerlastverkehr erforderlich.

Tabelle 2: Melde- und Warnwerte

	Setzung Mittelpfeiler [mm]	Kopfverschiebung Spundwand [mm]
Meldewert	10	20
Warnwert	25	30

5. Ergebnisse

Die Anker wurden am 19.06.2009 vorgespannt und am 23.06.2009 begannen die Aushubarbeiten. Vor und nach den Ankerarbeiten wurden die geodätischen Messungen und die Inklinometermessungen durchgeführt.

Während des Aushubs wurden die Setzungen und Verschiebungen mindestens täglich gemessen. Die geodätischen Vermessungen der Setzungsbolzen am Mittelpfeiler und des Spundwandkopfes erfolgten durch das Vermessungsbüro Wolfsburg Joachim Stein - Ewald Stroot. Von der GGU Braunschweig wurden die Inklinometermessungen durchgeführt.

Die Setzungen der vier Messbolzen am Mittelpfeiler sind in Abbildung 9 bezogen auf die Messung vom 18.06.2009 vor Beginn der Aushubarbeiten aufgetragen. Die Werte liegen im Bereich der Messunsicherheit. Es ergaben sich keine Verformungen, die Maßnahmen erforderten.

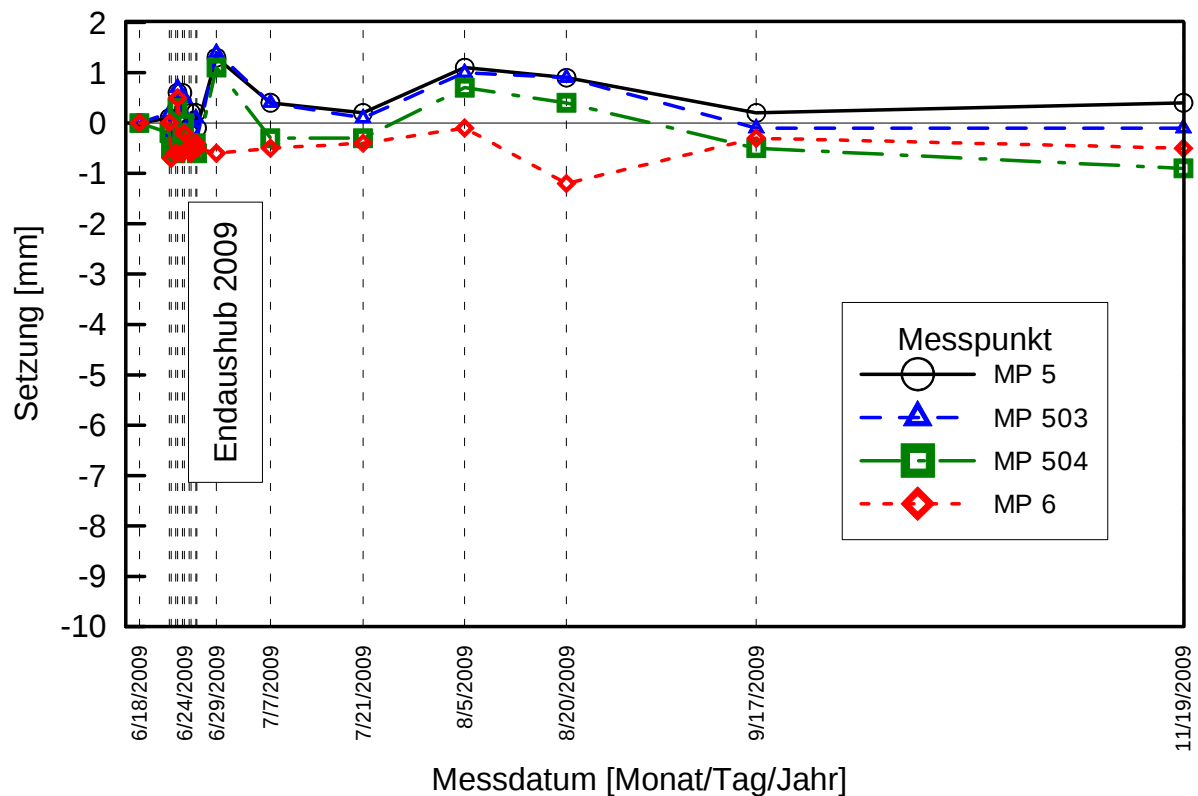


Abbildung 9: Setzungen des Mittelpfeilers relativ zur Messung vom 18.06.2009

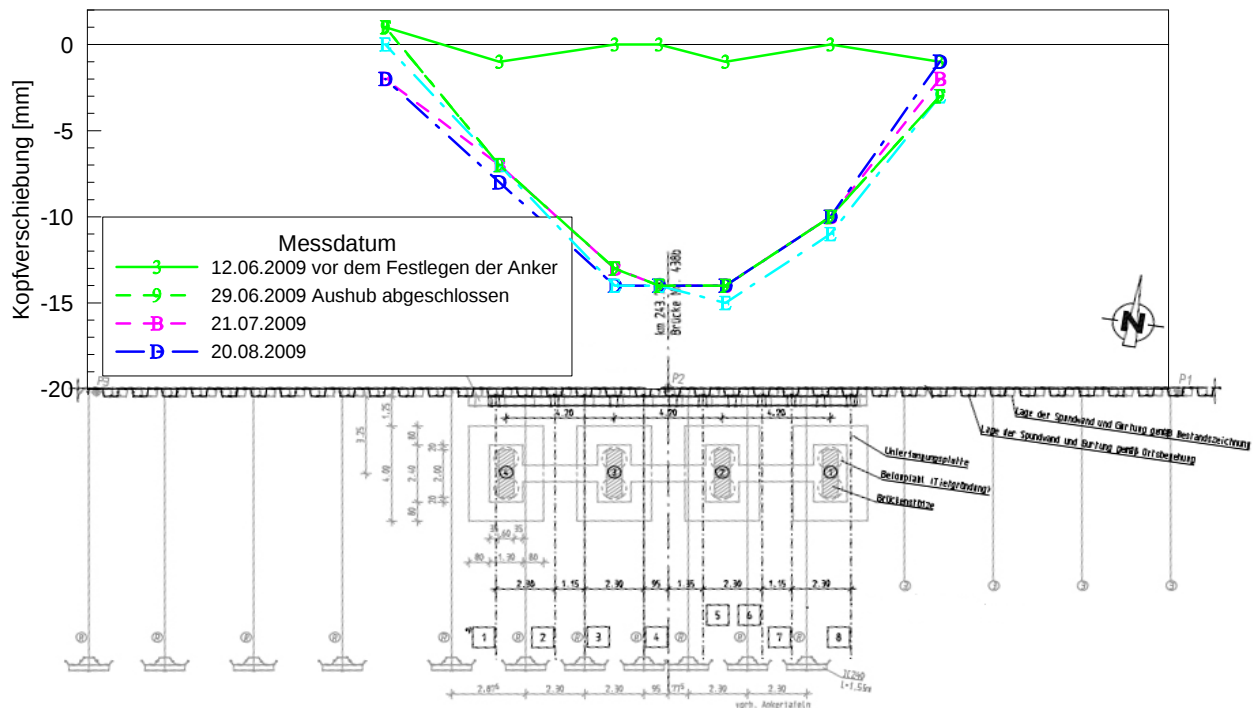


Abbildung 10: Kopfverschiebungen der Spundwand

Durch das Festlegen der Anker ergaben sich Kopfverschiebungen der Spundwand in Richtung Land von bis zu 1,5 cm. In Abbildung 10 sind diese im Lageplan dargestellt.

In den Inklinometermessungen ergab sich ein vergleichbares Bild. Im Bereich der Verankerung konnten im Inklinometer I 2 nach dem Festlegen der Anker Kopfverschiebungen in Richtung Land festgestellt werden (Abbildung 11). Dargestellt sind die Verschiebungen in Richtung MLK bezogen auf die Nullmessung. In Abbildung 12 sind die Horizontalverschiebungen seit dem Festlegen der Anker aufgetragen.

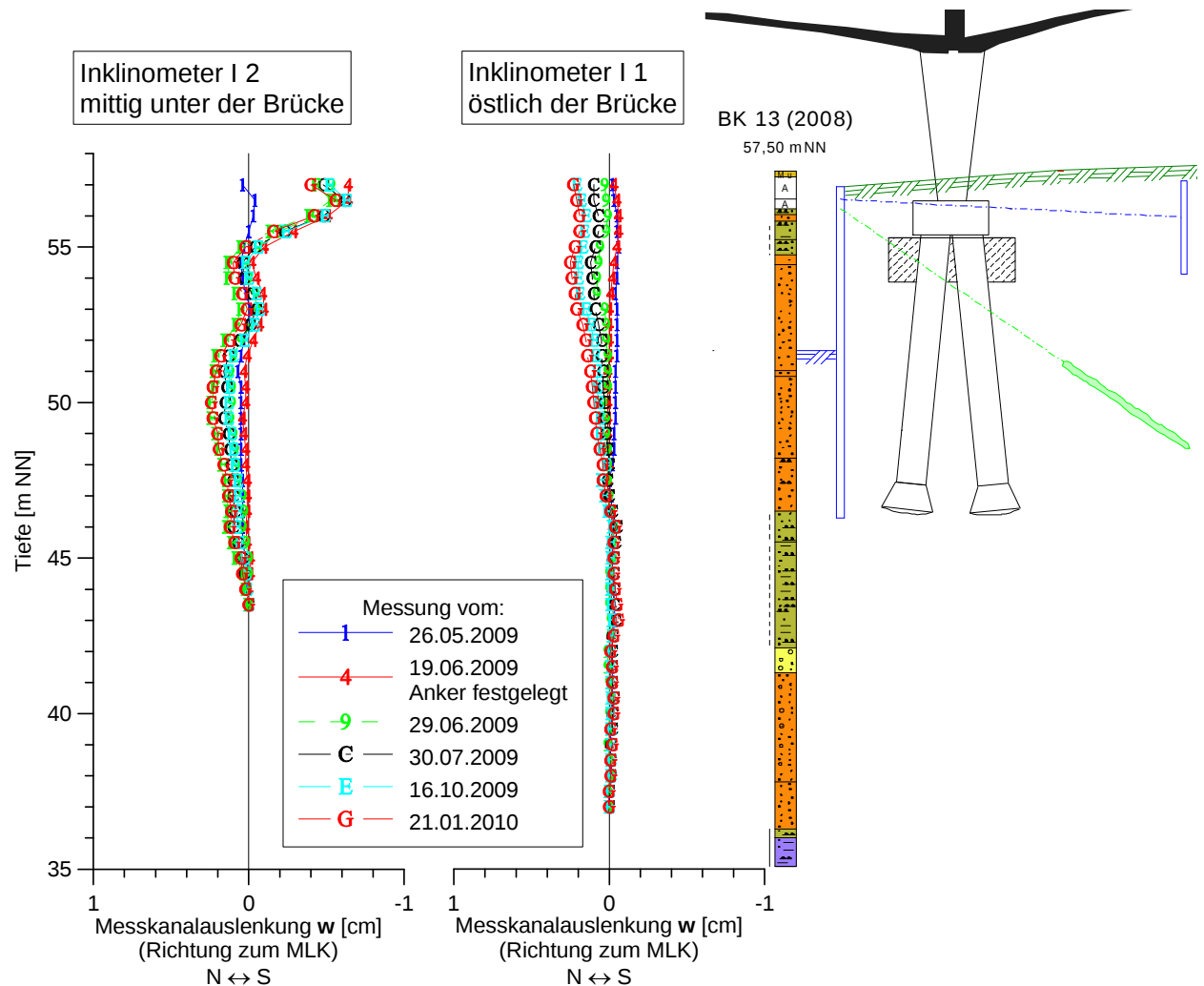


Abbildung 11: Ergebnisse der Inklinometermessungen
Messdaten bezogen auf die Nullmessung vom 26.05.2009

Die relativ großen Kopfverschiebungen der Spundwand nach dem Festlegen der Anker sind vor allem auf die locker gelagerte Hinterfüllung des Spundwandkopfes zurückzuführen.

Die Verformungen der Spundwand traten im Wesentlichen während des Aushubs auf. Im weiteren Verlauf kam es zu noch geringeren Verschiebungen, die jetzt weitgehend abgeklungen sind. Die horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten der Spundwand sind vernachlässigbar klein. Kritische Zustände, bei denen die Melde- oder Warnwerte erreicht werden, sind nicht zu erwarten.

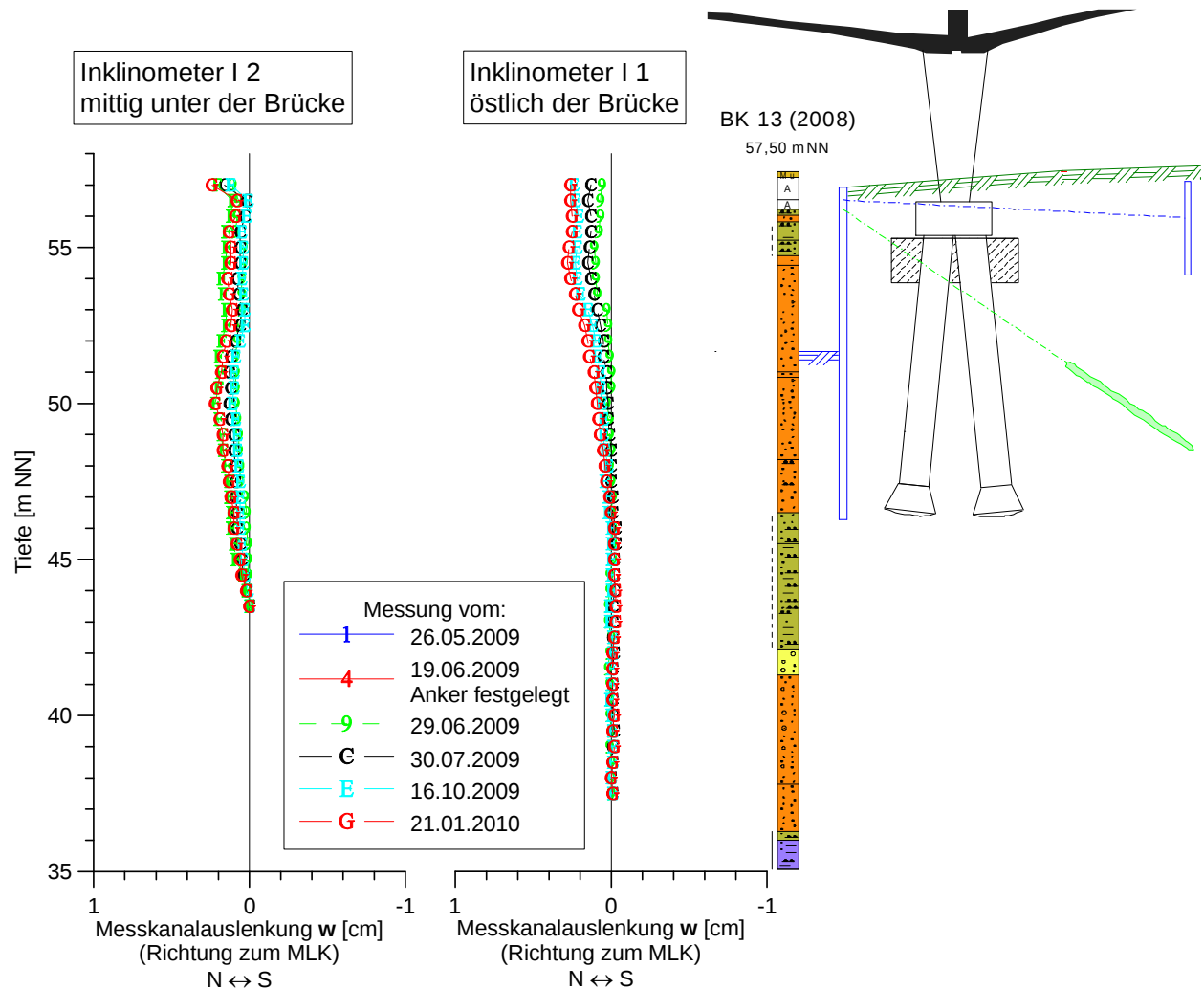


Abbildung 12: Ergebnisse der Inklinometermessungen

Messdaten bezogen auf die Messung vom 19.06.2009 (Anker festgelegt)

Auch wenn die Horizontalverformungen insgesamt gering sind, ist aus den Inklinometermessungen das Tragverhalten der Ufereinfassung während des Aushubs abzulesen. Im Inklinometer I 1, dass außerhalb der Nachverankerung liegt, sind vor allem Verschiebungen des Spundwandkopfes zu beobachten. Die „schlaaffe“ Verankerung durch die Ankertafeln muss hier erst aktiviert werden. Im Inklinometer I 2 hingegen ist der Spundwandkopf durch die Verpressanker festgelegt. Hier treten die Durchbiegungen vor allem im Feldbereich auf und das Erdauflager wird belastet.

6. Zusammenfassung

Ende der fünfziger Jahre wurde in Wolfsburg über den Mittellandkanal die Brücke Sandkamp in Höhe des VW-Werks gebaut. Der Mittelpfeiler der Brücke hatte sich nach Herstellung des Brückenüberbaus und beim Ausbau der Mittellandkanals erheblich gesetzt. Das Südufer des MLK unmittelbar neben dem Mittelpfeiler wurde mit einer rückverankerten Spundwand ausgebaut. Wegen der Setzungen der Brücke konnte der Kanal nicht auf Endtiefe ausgehoben werden.

2009 sollte die volle Befahrbarkeit wieder hergestellt werden. Für den Mittelpfeiler waren nur noch geringe zusätzliche Setzungen zulässig, um die Gebrauchstauglichkeit und auch Tragfähigkeit des Brückenüberbaus nicht zu gefährden.

Stand sicherheits- und Verformungsberechnungen der Ufereinfassung und des Brückenpfeilers ergaben, dass bei weiterem Aushub des Kanals die Grenzwerte der noch zulässigen Setzungen eingehalten werden können. Zur Entlastung der vorhandenen hoch ausgelasteten Verankerung der Uferspundwand wurde eine zweite Ankerlage eingebaut.

Die Setzungen der Brücke und die Verformungen der Uferspundwand wurden aushubbegleitend durch Setzungs- und Inklinometermessungen überwacht. Die Verschiebungen waren insgesamt gering. Bauzeitlich traten keine kritischen Zustände ein. Erst in den Monaten nach den Aushubarbeiten ergaben sich geringe Verformungen der Spundwand.

Mit der Anwendung der Beobachtungsmethode konnten somit umfangreiche, zeit- und kostenintensive konstruktive Lösungen vermieden werden und der Lückenschluss des Mittellandkanals erfolgreich ausgeführt werden.

7. Unterlagen

Bestandspläne, Querprofile, WSA Uelzen, WNA Helmstedt 2001

Pfahlplan, Unterlagen zur Entlastung der Bohrpfähle, Bestandszeichnung, Lenz-Bau, Hannover, 1959

Brücke Sandkamp VW-Werk - Beurteilung der Gründung, Prof. Streck, TH Hannover, 1958

Wolfsburg, MLK Brücke 438 b „Sandkamp“, Geotechnische Untersuchungen, Standsicherheitsberechnungen, Messkonzept, GGU, Braunschweig, 2008, 2009

Statische Berechnung, Verankerung Uferwand, grbv, Hannover, 2009

Setzungsmessung VW-Werk Wolfsburg, Brücke Sandkamp, Vermessungsbüro Wolfsburg, 2009

Dr.-Ing. Carl Stoewahse

GGU Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik

Am Hafen 22

38112 Braunschweig

Dipl.-Ing. Edgar Hartwig

Volkswagen AG

38436 Wolfsburg

Dipl.-Ing. Reinhold Aselmeier

WNA Helmstedt

Walbecker Straße 23b

38350 Helmstedt

Dr.-Ing. Günter Tranel

Eriksen und Partner GmbH

Gottorpstraße 14

26122 Oldenburg