



FE-basierte Erddruckermittlung beim Neubau der Weserschleuse in Minden

Dipl.-Ing. Michael Molck, RMD Consult GmbH, Abteilung Bautechnik
Dipl.-Ing. Regina Kauther, Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Geotechnik
Dipl.-Ing. (FH) Michael Höher, RMD CONSULT GmbH, Abteilung Bautechnik
Civ.-ing. (Univ. Luleå) Anne-Marie Sannebjörk, Ing.-Büro Dr. Kupfer

1 Einleitung

Am Wasserstraßenkreuz Minden wird der Mittellandkanal mit einer Wasserspiegeldifferenz von zirka 13,30 m über die Weser geführt. Mit dem Neubau der Weserschleuse Minden wird die Leistung des Nordabstiegs entsprechend den Anforderungen der zukünftigen Verkehrsstruktur erweitert.

Die Weserschleuse wird als Sparschleuse mit drei einseitig angeordneten Sparbecken geplant. Die Bauwerkslänge beträgt 214,30 m bei einer Nutzlänge von 139 m. Das Bauwerk mit einer Gesamtbreite von 74 m wird mit einem Achsabstand von 52 m zur vorhandenen Schachtschleuse Minden positioniert. Die Weserschleuse Minden wird als ein im Baugrund eingebettetes Bauwerk mit horizontaler Sohle hergestellt.

Bereits während der Entwurfsphase wurde die Erddruckeinwirkung auf der Grundlage von Finite-Element-Berechnungen ermittelt und damit der Erddruckansatz für die statischen Berechnungen in der Entwurfsphase und für die folgende Ausführungsplanung festgelegt.

2 Erddruckermittlung

2.1 Vorgehensweise

Mit der Neuformulierung der DIN 1055-100 (März 2001) „Einwirkungen auf Tragwerke“ wird auf der Grundlage entsprechender europäischer Vornormen (DIN V ENV 1991-1) auch in Deutschland das Nachweisverfahren unter Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten gefordert. Da verschiedene Einwirkungen wie Bodeneigengewicht, Beanspruchung aus Temperatur sowie Betriebs- und Grundwasserstände mit unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden, müssen einem in der BAW entwickeltem Konzept folgend die entsprechenden Erddruckanteile für die Bemessung des Massivbaus getrennt bestimmt werden.

Für die Ermittlung der maßgebenden Erddruckeinwirkungen wird zunächst ein Grundlastfall definiert. Im Grundlastfall werden für den Zustand des fertig gestellten Bauwerks die Erddruckverteilung bei ständig wirkendem (minimalen) Grundwasserstand hinter dem Bauwerk und dem ständig wirkenden Schleusenwasserstand (Unterwasserstand) berechnet. Danach werden weitere Lastfälle definiert, die aufbauend auf dem Grundlastfall jeweils eine weitere (nicht ständige) Einwirkung berücksichtigen.

Im Einzelnen wurden folgende Lastfälle berechnet:

- Grundlastfall (bei ständig wirkendem Grundwasserstand und Schleuse auf Unterwasser)
- Betriebswasserstand in der Schleusenkammer auf Oberwasser
- Grundwasser im Hochwasserfall
- Temperatureinwirkung Sommer
- Temperatureinwirkung Winter
- Einwirkung aus Verkehrslasten

Für jede zusätzliche Einwirkung erfolgt eine Neuberechnung des Finite-Element-Modells. Die Differenzen zwischen den Erddruckverteilungen unter Berücksichtigung veränderlicher Lasten und der Erddruckverteilung des Grundlastfalls liefern die Differenzerrddruckverteilungen, die für die entsprechende Einwirkung gilt. Die Differenzerrddrucke können sowohl entlastend als auch belastend gegenüber der Erddruckverteilung des Grundlastfalls sein.

Die gesamte Erddruckeinwirkung für die maßgebenden Lastfallkombinationen bei der Bemessung wird durch die Überlagerung des Grundlastfalls mit den entsprechenden Differenzlastfällen gebildet (z.B. Grundlastfall + Grundwasser bei HW + Temperatur Sommer). Die Zulässigkeit der Überlagerung der Ergebnisse aus den nichtlinear ermittelten Erddruckanteilen wird durch die Berechnung von Kombinationslastfällen überprüft.

Die Berechnungsergebnisse der FE-Berechnung werden durch den Vergleich mit den nach Erddrucktheorie ermittelten Erddruckverteilungen einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Ziel der Ermittlung der Erddruckeinwirkung mit einer FE-Berechnung ist die Festlegung eines realitätsnahen Erddruckansatzes unter Berücksichtigung der Bauwerkssteifigkeit und von Lastansätzen, die bei der klassischen Erddruckverteilung nicht berücksichtigt werden (z. B. Betriebswasserstände, Temperatur). Es wird erwartet, dass das Vorgehen zu einer besseren Übereinstimmung mit den wirklich vorliegenden Verhältnissen und somit zu mehr Sicherheit bei der Bemessung führt. Die Bemessung wird so mehr bedarfsorientiert durchgeführt und führt, insbesondere bei der Dauerhaftigkeit, zu einer höheren Qualität des Bauwerks.

Die Vorgehensweise setzt voraus, dass die allgemeinen Anforderungen bei der Durchführung von Finite-Element-Berechnungen erfüllt werden. Dazu gehört neben der Festlegung des Stoffgesetzes und der entsprechenden Baugrundparameter u.a. die Auswahl ausreichend großer Abmessungen des Finite-Element-Modells (Einfluss des Modellrandes auf die Berechnungsergebnisse). Der Berechnungsausschnitt sollte auch alle Bauwerksteile enthalten, die einen Einfluss auf die Bauwerks-Baugrund-Interaktion besitzen. Bei der Diskretisierung des Netzes sind die inzwischen in der Literatur dokumentierten Regeln [2, 3, 4, 5] zu beachten. Gegebenenfalls sind verschiedene Netzteilungen zu verwenden und der Einfluss der Größe der Kontinuumelemente auf die Berechnungsergebnisse zu überprüfen. Die Diskretisierung konstruktiver Elemente, wie z.B. nach dem Bau verbleibende Baugrubenverbauelemente ist vor der Ermittlung der Erddruckverteilungen zu überprüfen. Dies gilt auch für Einflüsse aus dem Ansatz von Übergangselementen (Interface), die zwischen dem Baugrund und dem Bauwerk vorgesehen werden. Bei der Diskretisierung der Verankerungselemente sind Einflüsse aus der vereinfachten ebenen Abbildung räumlicher Tragwerke (z. B. Verankerungen), zu beachten.

Die Berechnungsergebnisse werden hier in einer unabhängigen Vergleichsrechnung nach dem Vier-Augen-Prinzip verifiziert.

2.2 Anwendung

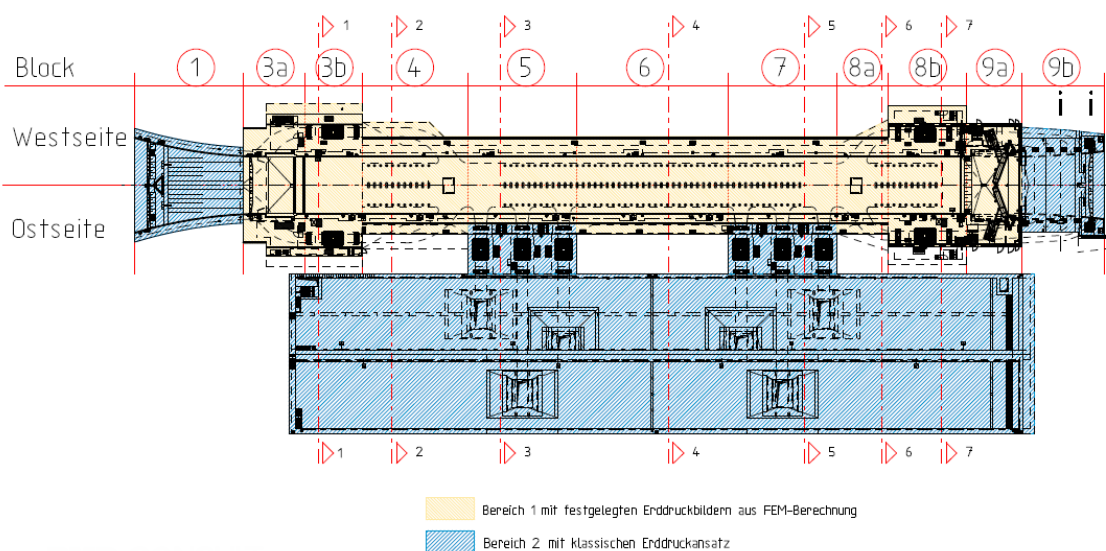


Bild 1: Einteilung der Bereiche und Festlegung der Berechnungsschnitte für den Erddruckansatz am Gesamtbauwerk

Die Erddruckberechnung für die Weserschleuse Minden wird in insgesamt sieben für das Bauwerk maßgebenden ebenen Schnitten durchgeführt. Durch die Wahl der Schnittführungen werden die Einflüsse auf die Erddruckverteilung aus den in Längsrichtung veränderlichen Bauwerkssteifigkeiten, aus den Verformungen aus Lasteinwirkung und aus den Geländeoberkanten berücksichtigt. Die Bodenschichten verlaufen in Längsrichtung im wesentlichen horizontalt stabil, so dass der Schichtenaufbau hier für die Wahl der Schnittführungen nicht maßgebend ist. Die untersuchten Bauwerksschnitte befinden sich im Kammerbereich, der bis in das Ober- und Unterhaupt hineinreicht. In diesem Bereich wird aufgrund der Querschnittsgeometrie, offenes U mit einer Schenkellänge von zirka 19 m, ein maßgebender Einfluss aus Bauwerksverformungen auf die Erddruckverteilung erwartet. Wegen der unterschiedlichen Ausbildung der Hinterfüllung auf beiden Seiten der Schleuse wird in einem Berechnungsschnitt zwar das gesamte Bauwerk berechnet, die Auswertung wird dagegen für beide Seiten (West und Ost) getrennt durchgeführt. Für Bauwerksbereiche, in denen der Einfluss aus Bauwerksverformungen aus Lasteinwirkungen als nicht maßgebend für die Erddruckverteilung abgeschätzt wurde, wird der Erddruckansatz gemäß der klassischen Erddrucktheorie mit den Grenzwerten aktiver Erddruck und Erdruhedruck gebildet. Die Aufteilung der Bereiche und die Schnittführungen der sieben Berechnungsschnitte wird in Bild 1 dargestellt.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Erddruckermittlung und die Ableitung eines Erddruckansatzes am Beispiel Schnitt 4-4 – Westseite erläutert.

Der Modellausschnitt wurde so groß gewählt, dass der Einfluss der Modellgrenzen auf die Berechnungsergebnisse vernachlässigbar klein ist. Der gesamte geplante Baugrubenverbau inkl. Dichtelemente gegen das Grundwasser und die bestehende Schachtschleuse wurden berücksichtigt und entsprechend abgebildet. Aus diesen Anforderungen ergibt sich eine gewählte Gesamtbreite des Berechnungsmodells von 190 m. In der Höhe misst das Modell insgesamt 75 m. Der untere Modellrand wurde mit 55 m zirka um das Dreifache der durchschnittlichen Bauwerkseinbindung in den Baugrund festgelegt. Ein Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell mit der Darstellung der Bodenschichten wird in Bild 2 dargestellt.

Vor der Berechnung der o.g. Lastfälle für den Grundlastfall und die Zusatzeinwirkungen wurde die Belastungsgeschichte aus dem Ausgangszustand und der Herstellung der neuen Schleuse einschließlich der sich einstellenden Grundwasserabsenkung mit entsprechenden Lastfällen abgebildet. Nach der Herstellung der Baugrube und des Bauwerks in mehreren Lastfällen werden ebenfalls Schleusungsvorgänge berechnet.

Neben der Erddruckermittlung wurde mit den FE-Modellen auch der Einfluss der Baumaßnahme auf die bestehende Schachtschleuse untersucht.

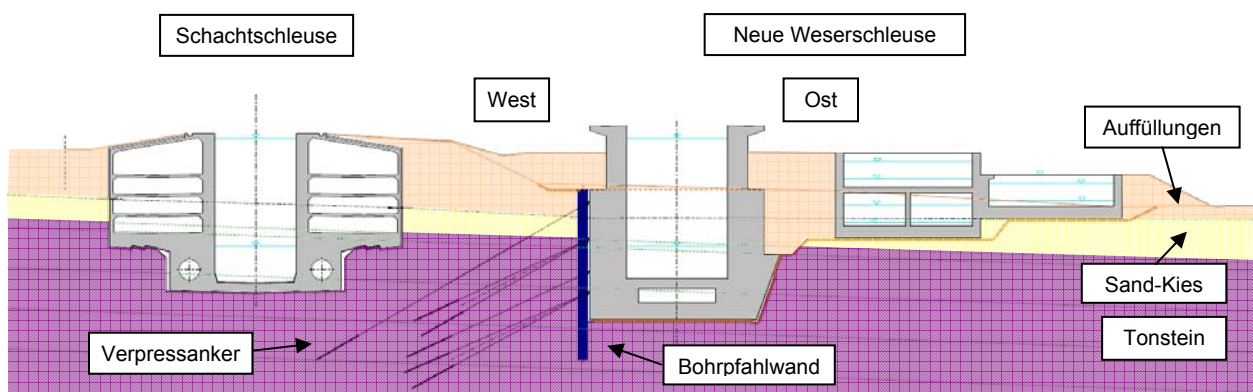


Bild 2: Berechnungsschnitt 4-4

Für die im Entwurf durchgeführten Untersuchungen wurden die Programme PLAXIS Version 8.2 und Sofistik und die in den Programmen implementierten Stoffgesetze „Hardening Soil (HS)“ (PLAXIS) und „GRAN“ (Sofistik) verwendet. Der wesentliche Unterschied in den Stoffgesetzen liegt in der zusätzlichen Berücksichtigung volumetrischer Verfestigung mit einer geeigneten Fließfläche (Kappe) im Stoffgesetz Hardening Soil. Bei beiden Programmen wird als Eingangsparameter die Sekantensteifigkeit $E_{50, \text{ref}}$ und der Entlastungsmodul E_{UR} angesetzt, der aus im Labor bzw. in situ ermittelten Bodenkennwerten abgeleitet werden kann. Darüber hinaus benötigt das Hardening Soil Modell noch einen zusätzlichen Steifig-



keitsparameter für oedometrische Belastung. Obwohl die beiden Stoffgesetze in rein triaxialer Beanspruchung ähnliche Ergebnisse liefern, ist dies bei oedometrischer Belastung und bei Randwertproblemen i.d.R. nicht der Fall. Durch die fehlende Kappe reagiert GRAN in volumetrischer Erstbelastung i.d.R. steifer als Hardening Soil.

Die Auswirkungen auf die berechneten Verformungen sind jedoch im Fall der Anwendung auf die Schleuse Minden, wie anhand der Vergleichsberechnungen gezeigt werden kann, i.a. nicht sehr groß, da Schubbeanspruchungen in der Baugrund-Bauwerksinteraktion dominant sind.

Für den Beton der Massivbauteile wurde isotrop elastisches Materialverhalten unterstellt.

Nach der Berechnung der Lastfälle wurden für die Erddruckverteilungen die horizontalen effektiven Spannungen im Baugrund hinter der Bohrpfehlwand bzw. der Bauwerksaußenwand ausgewertet. Die Erddruckverteilung für den Grundlastfall ergibt sich direkt aus dem entsprechenden Lastfall. Die Erddruckverteilung befindet sich im Bereich zwischen aktivem und Erdruhedruck. Im Bereich der Auffüllungen liegt die Erddruckverteilung auf dem Niveau des Erdruhedrucks. Die Erddruckverteilungen für die Zusatzlasten wurden aus der Differenz des jeweiligen Lastfalls mit dem Grundlastfall gebildet. Bei entlastenden Zusatzeinwirkungen (z. B. Winter) liegt das Niveau deutlich über dem aktiven Erddruck. Bei belastenden Zusatzeinwirkungen (z. B. Sommer, Betriebswasserstand oben) wird in Teilbereichen das Niveau des Erdruhedrucks überschritten.

Bei der Auswertung der Kombinationslastfälle wurde ein großer Einfluss der Reihenfolge der Lastaufbringung auf die ermittelte Erddruckverteilung festgestellt. Die besten Ergebnisse wurden für eine Belastungsgeschichte entsprechend der tatsächlichen Abläufe erzielt. Z. B. stellen sich die festgelegten Temperaturlastfälle mit den Extremwerten für Sommer und Winter in relativ langen Zeiträumen ein (Wochen, Monate), während der Betriebswasserstand für die Schleusungsvorgänge in Relation in sehr kurzen Zeiträumen verändert wird (Minuten).

Der zugehörige Kombinationslastfall wurde so gebildet, dass ausgehend vom Temperaturlastfall in einem zweiten Berechnungsschritt die Veränderung des Oberwasserstands aufgebracht wird. Das Ergebnis der Erddruckverteilung passt mit tolerierten Abweichungen (kleiner als 10 %) mit der Überlagerung der Einzelleinwirkungen (Grundlastfall + Temperatur + Betriebswasserstand) überein. Die gleichzeitige Kombination der Zusatzeinwirkungen in einem Lastschritt führte dagegen zu wesentlich größeren Abweichungen (bis zu 40 %).

Die in der Vergleichsrechnung ermittelten Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den ermittelten Erddruckverteilungen.

Die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse der Erddruckermittlung und der Vergleichsberechnung und mit der klassischen Erddruckverteilung für den Grundlastfall und die Zusatzeinwirkungen Temperatur Sommer und Winter wird exemplarisch in Bild 3 dargestellt.

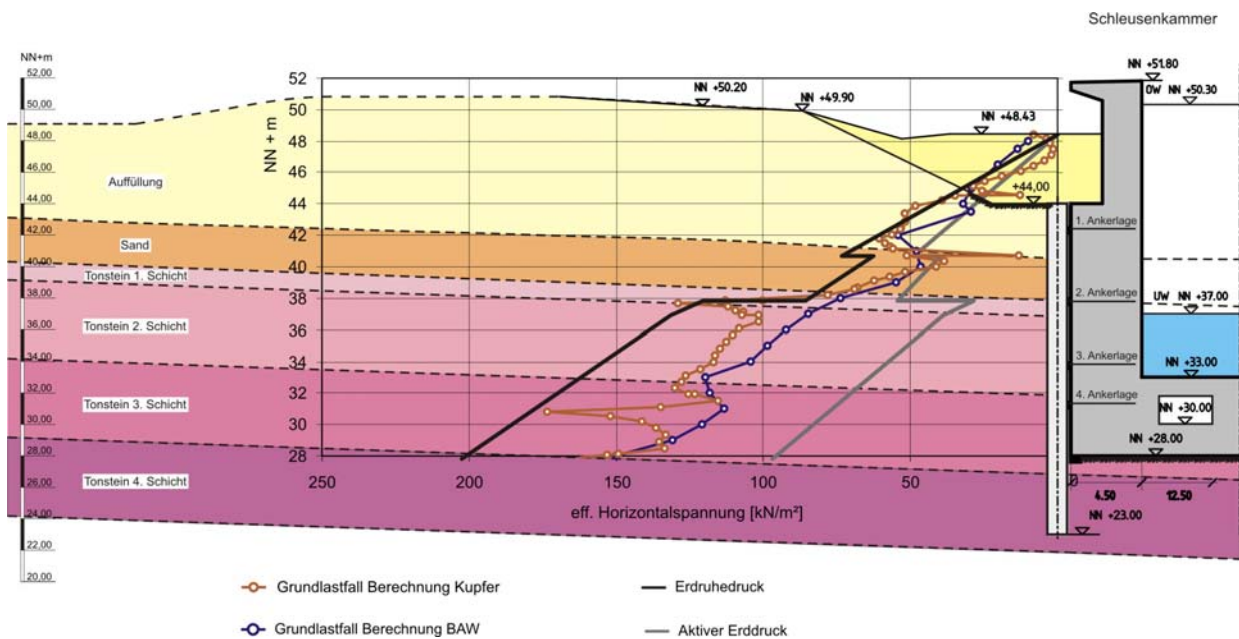


Bild 3: Gegenüberstellung von klassischem Ansatz mit den Ergebnissen der FE-Berechnung und der Vergleichsberechnung

In Bild 4 wird exemplarisch die Ableitung der Ersatzfigur für die Zusatzlast „Temperatur Sommer“ dargestellt. Im linken Bild werden die Ergebnisse der FE-Berechnung (runde Symbole), die klassischen Verteilungen (durchgehende Linien) und die zusammengesetzte Ersatzfigur (quadratische Symbole) dargestellt. Im rechten Bild werden die Differenz zwischen den bei der FE-Berechnung ermittelten Lastfällen „Grundlastfall“ und „Temperatur Sommer“ (runde Symbole) und die daraus abgeleitete Ersatzfigur (eckige Symbole) dargestellt. Es wird hier besonders darauf hingewiesen, dass die Ersatzfigur im rechten Bild festgelegt wird, während die Ersatzfigur im linken Bild aus der Überlagerung der Einzelerersatzfiguren der Lastfälle „Grundlastfall“ und „Temperatur Sommer“ entstanden ist.

Zwischen NN + 41 m und NN + 37 m ist eine deutliche Abweichung zwischen dem klassisch berechneten Erdruchdruck und dem mit FE ermittelten Erddruck festzustellen. Dieser ist durch den Einfluss einer erhöhten Steifigkeit des Baugrundes in dieser Tiefenlage zur erklären. Dieser Bereich wird durch die zusammengesetzte Ersatzfigur entsprechend abgebildet.

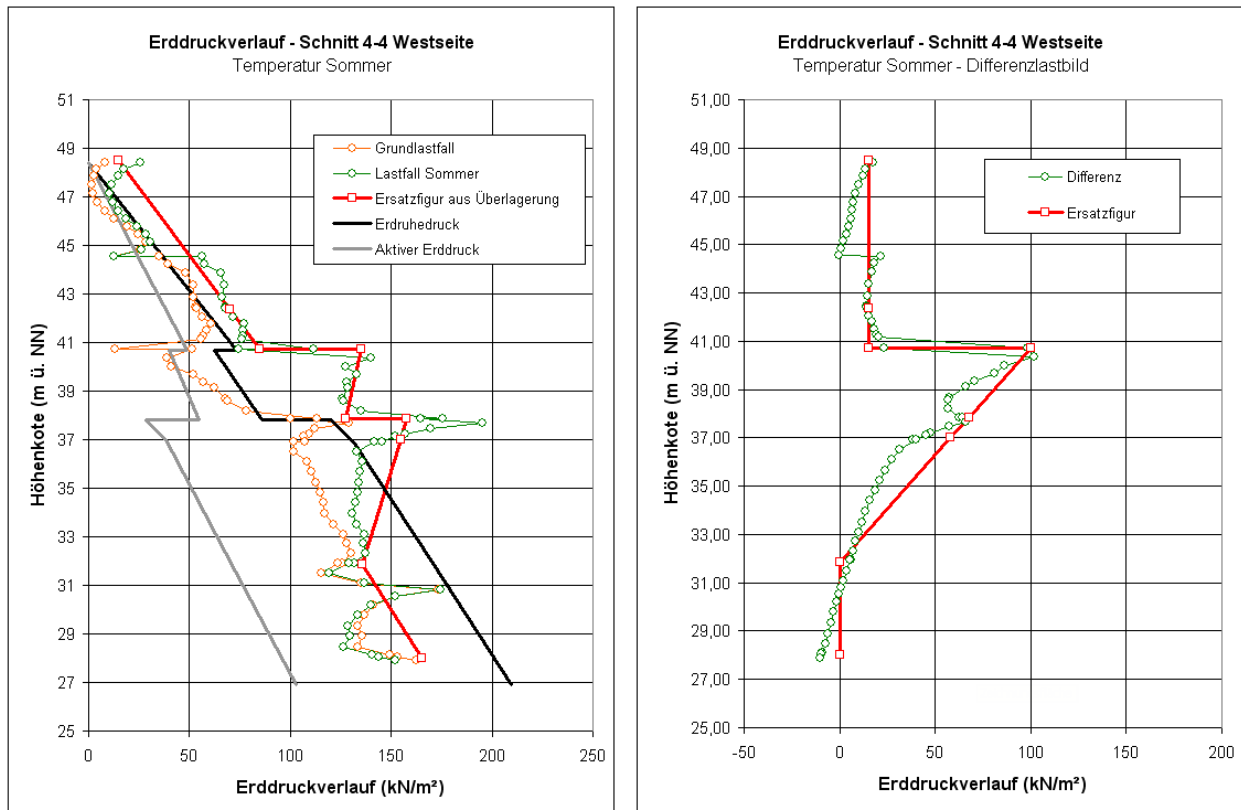


Bild 4: Ableitung Ersatzfigur für den Lastfall Temperatur Sommer

Die Zusammenstellung der Ersatzfiguren für den Grundlastfall und die Zusatzeinwirkungen für den Schnitt 4-4 – Westseite wird in Bild 5 dargestellt.

Für die Festlegung eines umfassenden Erddruckansatzes für das Gesamtbauwerk werden die Berechnungsschnitte den festgelegten Bauwerksbereichen zugeordnet (siehe Bild 1). Bei der Auswertung der untersuchten Berechnungsschnitte ist eine allgemeingültige Ableitungsregel nicht erkennbar, so dass die Betrachtung zunächst für jeden Schnitt und für jede Seite einzeln durchgeführt wurde. Anschließend wurde geprüft, welche Lastbilder sich vereinheitlichen lassen.

Für den Grundlastfall ergeben sich bis auf der Westseite der Schleuse abhängig von der Geländehöhe verschiedene Ersatzfiguren. Bei vergleichbaren Verhältnissen werden einzelne Schnitte mehreren Bereichen zugeordnet (z.B. Schnitt 1-1 für Block 3a und 3b, Schnitt 5 für Block 7 und 8a) bzw. wurden die Ergebnisse aus mehreren Schnitten vereinheitlicht (z.B. Ost-Seite Blöcke 4 bis 8a). Bei der Auswertung der Zusatzeinwirkungen ist eine Vereinheitlichungen der Differenzersatzfiguren in bestimmten Bereichen über mehrere Schnitte, teilweise auch für beide Schleusenseiten möglich.

Weil keine eindeutige und einfach verständliche Regel für die Ableitung aufgestellt werden kann, werden die Erddruckbilder für den Grundlastfall und die Zusatzeinwirkungen für jeden Block getrennt nach West- und Ostseite festgelegt und dargestellt (vgl. Bild 5). Wiederholungen werden hier zugunsten einer eindeutigen und allgemein verständlichen Zuordnung der Lastbilder zu den Bauwerksblöcken toleriert.

Im Ergebnis ist die Erddruckeinwirkung für das gesamte Bauwerk vollständig und lückenlos formuliert. Für den Anwender gibt es so eine klare Vorgabe, und es besteht kein Auslegungsspielraum für die Bildung des Erddruckansatzes. Der Erddruckansatz wird im Lastenheft dokumentiert und ist damit neben der Verwendung in der Entwurfsplanung auch für die Ausführungsplanung verbindlich festgelegt. Mit diesem Vorgehen wird in der Phase für die Ausführungsplanung eine zeit- und kostenintensive Diskussion der Berechnungsansätze vermieden.

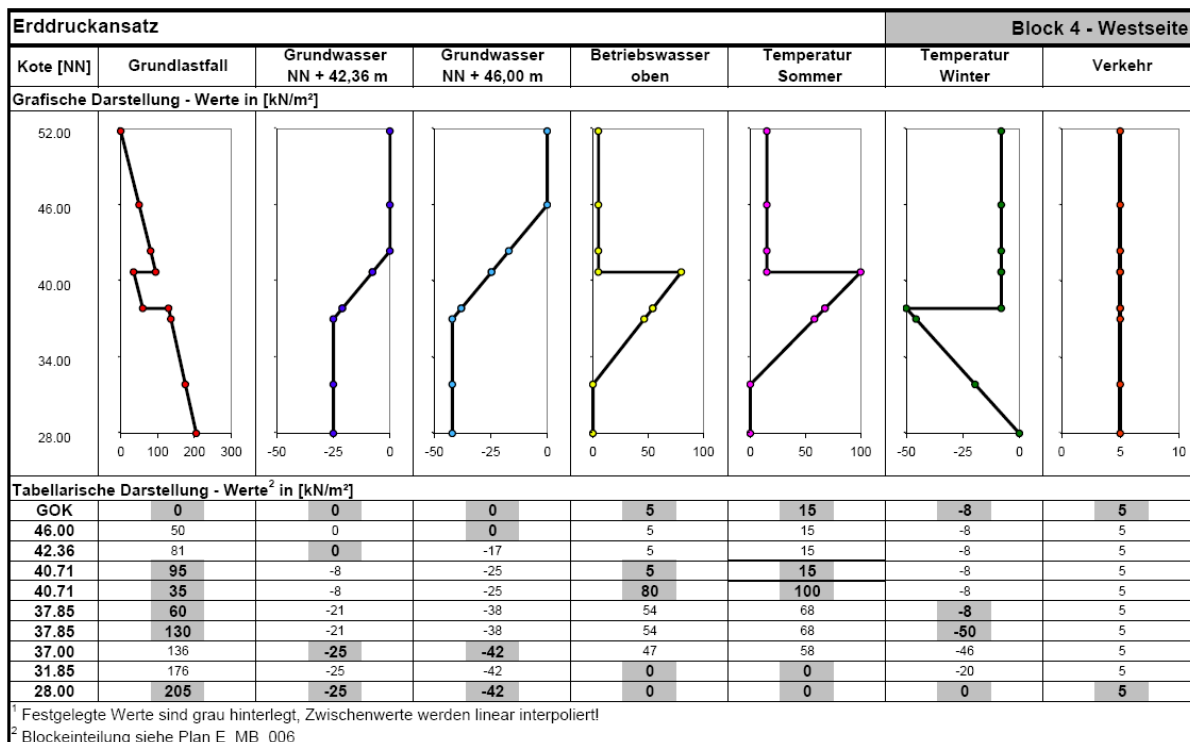


Bild 5: Erddruckansatz für den Berechnungsschnitt 4-4 – Westseite

3 Bemessung

Mit den festgelegten Erddruckansätzen wurde die Bemessung des Tragwerks in wesentlichen tragenden Querschnitten gemäß DIN 1045-1 und ZTV-W LB 215 durchgeführt. Auf dieser Grundlage werden die erwarteten Bewehrungsstahlmengen für eine Ausschreibung ohne bereits durchgeführte Ausführungsplanung ermittelt.

Bei der Bemessung wurde festgestellt, dass die festgelegten Erddruckbilder einen deutlichen Einfluss auf die Bewehrung im Vergleich zu einer Bemessung mit dem klassischen Erddruckansatz (aktiver und Erdruhedruck als Grenzwerte) haben. Durch den Umstand, dass das Niveau des aktiven Erddrucks nicht erreicht wird, wird hauptsächlich in der Kammerinnenwand und der Grundlaufdecke ein geringer Bewehrungsgehalt ermittelt. Die Beanspruchung dieser Bauteile ist in den maßgebenden Lastfällen, wegen der im Vergleich zum aktiven Erddruck größeren Erddruckeinwirkung, kleiner. In anderen Bereichen, wo die Erddruckverteilung lokal den Erdruhedruck übersteigt ist ein höherer Bewehrungsgrad erforderlich. Die Bilanz von Einsparung und Mehrerfordernis der Bewehrung ist von Berechnungsschnitt zu Berechnungsschnitt unterschiedlich, so dass die Veränderung des Bewehrungsgehaltes im Vergleich zur Bemessung mit klassischem Erddruckansatz zahlenmäßig nicht genau quantifiziert werden kann.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass bei der gewählten Vorgehensweise die Bewehrung entsprechend der tatsächlichen Beanspruchung positioniert werden kann. In der Folge werden die Lasten dort statisch abgeleitet, wo sie auftreten und die Lastumlagerungen am Tragwerk werden minimiert. So wird bei der Bemessung des Bauwerks eine größere Sicherheit und eine höhere Qualität erzielt.

Die größere Sicherheit spiegelt sich in der bedarfsorientierten Bemessung wieder. Es wird ausreichend Bewehrung vorgesehen, so dass die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit nachgewiesen werden können und eine Unterbemessung verhindert wird. Auf der anderen Seite wird eine Überbemessung auf Grund von zu konservativen Lastansätzen ebenfalls vermieden. Dadurch ist das Verfahren als wirtschaftlich zu betrachten.

Durch die optimierte Bewehrungsplanung wird zusätzlich zu mehr Sicherheit bei der Nachweisführung und der Wirtschaftlichkeit ein positiver Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks erwartet und so ein



qualitativ hochwertigeres Bauwerk erzielt. Als mögliche Folge könnte sich der Aufwand für Instandhaltungsarbeiten auf die Lebensdauer des Bauwerks reduzieren. Die Bestätigung dieser Erwartung wird allerdings erst durch Langzeiterfahrungen erfolgen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachweisführung nach dem Teilsicherheitskonzept erfordert die Ermittlung von Erddruckanteilen getrennt nach den verschiedenen Einwirkungen. Diese Anforderung ist mit der Formulierung der Erddruckeinwirkung auf Grundlage des klassischen Erddruckansatzes nicht möglich. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer FE-basierten Erddruckberechnung.

Darüber hinaus ergibt sich ein weiterer Nutzen für die Sicherheit bei der Bemessung und bei der Qualität des Bauwerks. Beides zusammen führt zu einer wirtschaftlichen Bemessung, weil sowohl die Überbemessung durch zu konservative Lastansätze als auch eine Unterbemessung durch zu verallgemeinerte Lastverteilungen reduziert wird. Zusätzlich wird eine höhere Qualität des Bauwerks im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit erzielt.

Die maßgebenden Einwirkungen für die Bemessung des Bauwerks resultieren aus Eigengewicht, Erd- und Wasserlasten sowie Zwangseinwirkungen. Das Eigengewicht und die Wasserlasten können relativ genau bestimmt werden und auch für die Zwangseinwirkungen bestehen bereits Ansätze für die FE-basierte Ermittlung und werden angewendet. Der bisher überwiegend verwendete und stark verallgemeinerte klassische Erddruckansatz, der durch FE-Berechnungen überprüft und bei Bedarf ergänzt wurde hat vor allen Dingen bei der Bewertung der Sicherheiten Defizite. Die konsequente Ermittlung der Erddruckverteilung mit einer FE-Berechnung und die Ableitung der Erddruckansätze daraus bilden hier einen wesentlichen Schritt zu einer größeren Bemessungssicherheit.

Die vorab an die Vorgehensweise gestellten Anforderungen und Ansprüche werden bei der Anwendung für die Weserschleuse Minden erfüllt. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass zum aktuellen Erkenntnisstand die Berechnungs- und Bemessungsergebnisse nicht auf andere Bauwerke oder Bauwerksgruppen verallgemeinert werden können. Bei der Bearbeitung wurde festgestellt, dass bereits kleine Veränderungen in den Randbedingungen große Auswirkungen auf das Ergebnis haben können. Aus diesem Grund ist für andere Bauwerke vorerst eine Untersuchung im Einzelfall erforderlich.

Erst bei einer ausreichenden Datenbasis mehrerer zukünftig nach diesem Prinzip untersuchten Projekte können Gemeinsamkeiten und Unterschiede festgestellt und ausgewertet werden, um allgemeingültige Regeln für die FE-basierte Erddruckermittlung und die anschließende Ableitung von Erddruckansätzen aufgestellt werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Überlagerung von nicht-linear ermittelten Einzelergebnissen.

Wichtiger Bestandteil ist dabei auch der Vergleich der Berechnung mit den Ergebnissen von baubegleitenden Messungen. Eine solche Auswertung wird z.B. zur Zeit an der Schleuse Süfeld ausgeführt.

Literatur

- [1] FEM in der Geotechnik - Qualität, Prüfung, Fallbeispiele -, Tagungsband zum Workshop an der TUHH 2005
- [2] Meißner, H., Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Teil 1, Geotechnik 14 (1991)
- [3] Meißner, H., Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Teil 2, Geotechnik 19 (1996)
- [4] Meißner, H., Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Teil 3, Geotechnik 25 (2002)
- [5] Schanz, T., Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Teil 4, Geotechnik 29 (2006)
- [6] Schanz, T., Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien, Universität Stuttgart, Mitteilung 45, 1998
- [7] Schweiger, H., Musterlösung und Parameterstudie für dreifach verankerte Baugruben – Anhang zur Empfehlung Nr. 3 des Arbeitskreises Numerik der DGGT. Geotechnik 25 (2002)