

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Odenwald, Bernhard; Oltmanns, Wolfgang

Herstellung der Baugrube für Schleuse Uelzen II mit dichtender Düsenstrahlsohle

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102389>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Odenwald, Bernhard; Oltmanns, Wolfgang (2007): Herstellung der Baugrube für Schleuse Uelzen II mit dichtender Düsenstrahlsohle. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Praktische Probleme der Geotechnik im Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 29-40.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Herstellung der Baugrube für Schleuse Uelzen II mit dichtender Düsenstrahlsohle

Jan Kayser, Bernhard Odenwald, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Wolfgang Oltmanns, Prof. Rodatz & Partner, Braunschweig

1 Bauwerk

Im Verlauf des Elbeseitenkanals (ESK) überwinden die Schleusen Uelzen I und Uelzen II einen Höhenunterschied von 23 m. Die Schleuse Uelzen I wurde 1976 fertig gestellt. Zur Erhöhung der Schleusungskapazitäten und zur langfristigen Betriebssicherheit des Kanals wurde die Schleuse Uelzen II von 1998 bis 2006 gebaut und am 8. Dezember 2006 eingeweiht. Bild 1 zeigt die neue und alte Schleuse.



Bild 1: Neue Schleuse Uelzen II (links) und alte Schleuse Uelzen I (rechts); Foto: NBA Hannover

Der Baugrund im Baufeld besteht i. w. aus Geschiebemergel und den Unteren Sanden (s. Bild 2). Der Geschiebemergel hat überwiegend halbfeste Konsistenz ($c_u = 200 - 700 \text{ kN/m}^2$). Die Unteren Sande bestehen aus enggestuftem Mittel- und Feinsand. Sie besitzen größtenteils eine sehr große Festigkeit und Lagerungsdichte, die Spitzendrücke aus der Spitzendrucksondierung CPT liegen i. d. R. bei $q_c > 50 \text{ kN/m}^2$.

Das Grundwasserpotenzial steht bei ca. NN +45 m an. Der gering durchlässige Geschiebemergel spannt das Grundwasser im Bereich der Baugrube an. Die Schleusensohle auf NN +30 m liegt ca. 15 m unter dem Grundwasserpotential. Die bestehende und die neue Schleuse haben einen Achsabstand von 70 m. Der lichte Abstand beträgt 30 m (s. Bild 2).

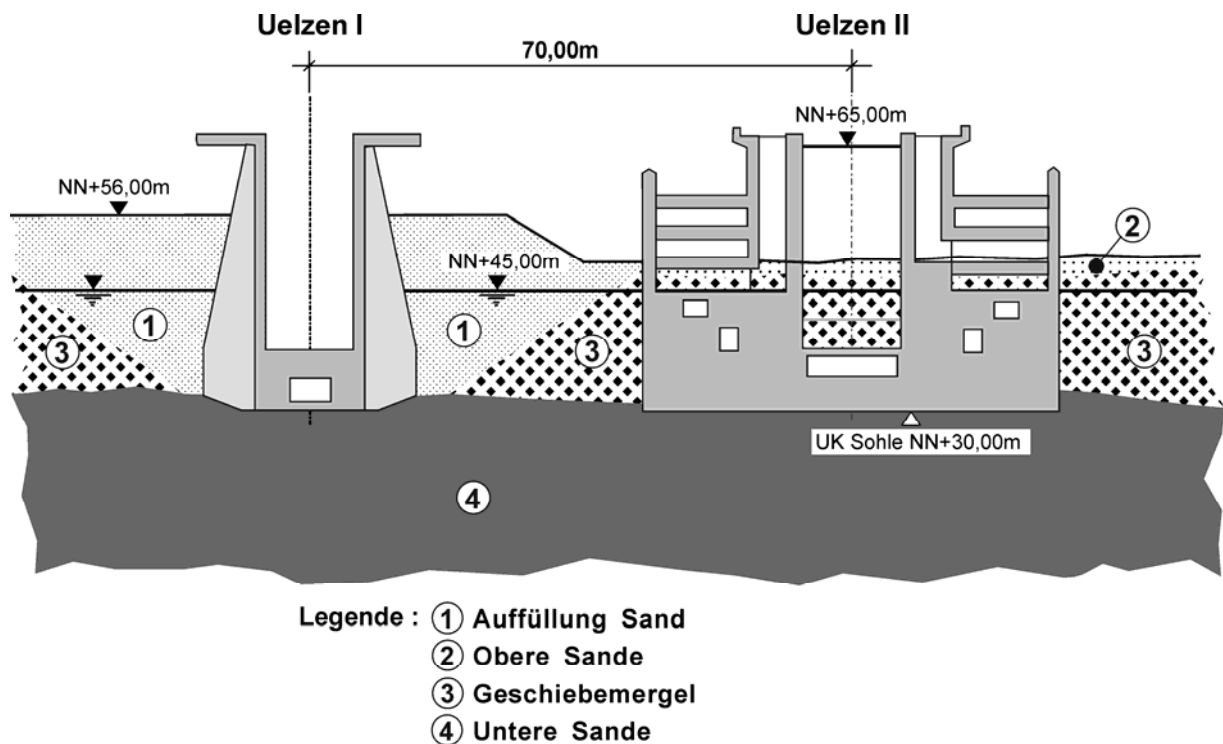


Bild 2: Baugrundaufbau im Querschnitt mit bestehender und neuer Schleuse

2 Baugrube

2.1 Konstruktion und Bauablauf

Da eine großräumige Grundwasserabsenkung für den Neubau der Schleuse nicht zugelassen war, musste die Schleuse in einer dichten Baugrube erstellt werden. Diese war 53 m breit, 265 m lang und ca. 18 m tief. Auf Grund eines Sondervorschlages kam eine ausgesteifte Baugrube mit einer mit dem Düsenstrahlverfahren (DSV) erstellten, 1,5 m mächtigen und vertikal rückverankerten, dichten Sohle zur Ausführung (s. Bild 3).

Zur Minimierung der Gefahr eines Hydraulischen Grundbruchs lag die DSV-Sohle zwischen 1,5 und 4 m unter der Baugrubensohle („mitteltief liegend“). Sie übernahm auch statische Funktion zur Stützung des Schlitzwandfußes. Zur Seite hin war die Sohle aufgewölbt, was statische und wirtschaftliche Vorteile hatte. Die vertikale Verankerung erfolgte mit GEWI-Ankern, die mit Hilfe des Düsenstrahlverfahrens eingebracht wurden. Die Anker sind über Reibung in die Sohle eingebunden. Die statische Last auf die Sohle, die i. W. aus 15 m Wasserüberdruck resultiert, wurde über Gewölbewirkung von der Sohle auf die Anker übertragen.

Der vertikale Baugrubenverbau bestand aus 1,2 m dicken Stahlbeton-Schlitzwänden. Die Schlitzwände und die DSV-Sohle bildeten zusammen einen dichten Trog. Die Baugrube war mit 3 Dichtwänden in Querrichtung (Schotte) in 4 Bereiche unterteilt, die getrennt voneinander mit Pumpversuchen auf ihre Dichtigkeit hin untersucht wurden.

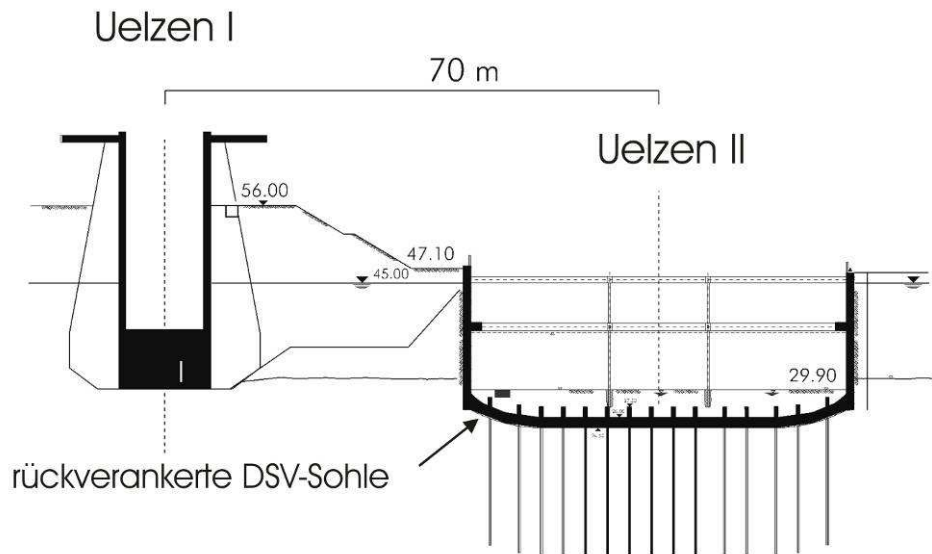


Bild 3: Baugrube mit vertikal rückverankerte Düsenstrahlsohle

Der Bauablauf war wie folgt:

1. Stahlbeton-Schlitzwand und Querschotte,
2. Voraushub von ca. 3 m,
3. Herstellung rückverankerte DSV-Sohle,
4. Pumpversuche zur Überprüfung der Dichtigkeit der Baugrube,
5. Herstellung Mittelstützen und 1. Steifenlage,
6. sukzessiver Bodenaushub und Einbau der 2. Steifenlage, Endaushub.

2.2 Düsenstrahlsohle

Die DSV-Sohle besteht aus den so genannten Tragsäulen, in denen ein GEWI-Anker zur Sicherstellung der Auftriebssicherung der Sohle eingebunden ist, und aus den Füllsäulen (s. Bild 4). Für die Tragsäulen galten erhöhte Anforderungen an die Festigkeit. Auf den Tragsäulen war als zusätzliche Sicherheit für die Einbindung der Pfähle in die Sohle noch ein Pfahlkopf von 1,5 m Länge gedüst, so dass die gesamte Verankerungslänge eines Gewi-Stabes in die Sohle 3 m betrug.

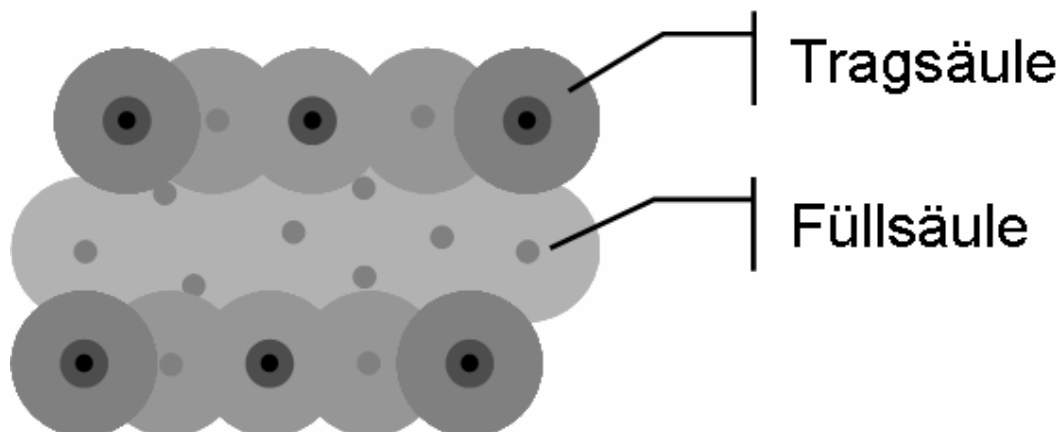


Bild 4: Sohle aus Trag- und Füllsäulen

Die Herstellung der Sohle erfolgte in 3 Phasen, jede für sich frisch in frisch (s. Bild 4: 1. Phase dunkelgrau, 2. Phase mittelgrau, 3. Phase hellgrau). Während die Tragsäulen und die jeweils verbindenden Füllsäulen (Bild 4, dunkel- und mittelgrau) in einem festen Raster erstellt wurden, erfolgte die Festlegung der Ansatzpunkte für die Füllsäulen im 3. Schritt nach Auswertung der Vermessungsdaten (s. u.) aus den ersten beiden Herstellschritten („dynamische Werkplanung“).

Für die Düsenstrahlarbeiten kam das 3-Phasen-Verfahren mit einer luftummantelten Zementsuspension als Schneidstrahl zum Einsatz.

Es war ein umfangreiches System zur Qualitätssicherung erforderlich. Von jeder Bohrung wurden der Bohransatzpunkt geodätisch und der Bohrlochverlauf mit einem im Bohrgestänge integrierten Inklinometer gemessen. An einer Vielzahl von Säulen wurde zusätzlich der Durchmesser mit einer Tastsonde bestimmt. Diese Daten wurden zeitnah in einem Lageplan ausgewertet. Mögliche Fehlstellen in der Sohle konnten so detektiert und ggf. mit Zusatzsäulen geschlossen werden.

Ergänzend wurden Kernbohrungen durch die Sohle gebohrt und daraus Proben für Festigkeitsuntersuchungen genommen.

Auf Grund des hohen Wasserüberdruckes von ca. 15 mWS bestand die Gefahr eines Hydraulischen Grundbruches in der verbleibenden Bodenüberdeckung oberhalb von möglichen, mit Sand gefüllten Fehlstellen in der Düsenstrahlsohle (z. B. infolge DÜSSchatten). Um die Gefährdung durch Fehlstellen beurteilen zu können, wurden von der BAW zur Ermittlung kritischer Fehlstellendurchmesser Finite-Elemente-Berechnungen mittels eines rotationssymmetrischen, vertikal-ebenen Grundwasserströmungsmodells durchgeführt (Bild 5).

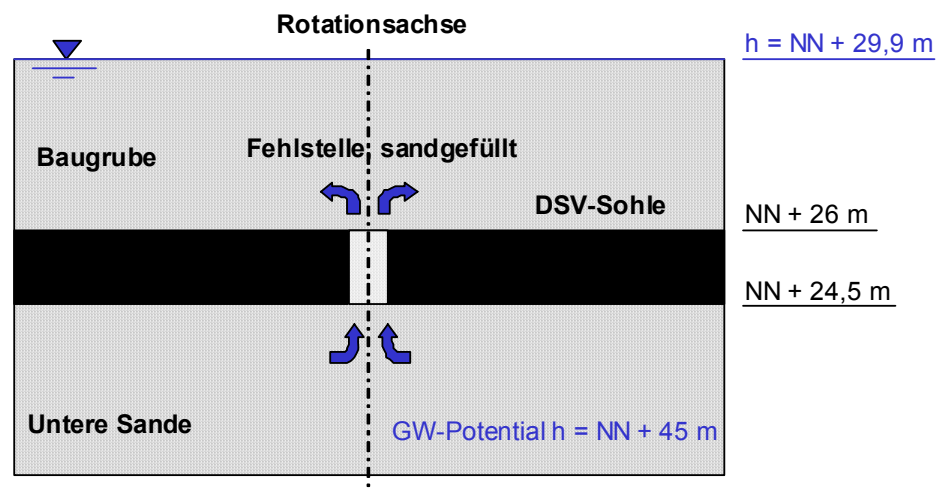


Bild 5: Berechnungsmodell für bodengefüllte Fehlstelle

In Abhängigkeit vom Fehlstellendurchmesser und der über der Dichtungssohle verbleibenden Bodenüberdeckung wurden der Durchfluss durch die Fehlstelle sowie die Strömungskräfte ermittelt. Darauf basierend wurde die Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch nach dem Ansatz von Bieberstein [Bieberstein et al, 1999] bestimmt. In Bild 6 sind die Sicherheiten gegen Hydraulischen Grundbruch sowie der resultierende Durchfluss in Abhängigkeit vom Fehlstellendurchmesser für die Bodenüberdeckung der Düsenstrahlsohle von 3,9 m Überdeckung dargestellt. Danach ergibt sich für eine Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch von $\eta = 1,5$ der kritische Durchmesser einer bodengefüllten Fehlstelle zu ca. 1,1 m und der resultierende Zufluss zu ca. 2,2 l/s.

Zur Überprüfung der fertiggestellten Dichtsohle wurde vor dem Baugrubenaushub in den durch Querdichtwände abgetrennten Teilbaugruben mit einer Grundfläche von maximal ca. 4.000 m² jeweils ein Pumpversuch durchgeführt. Dabei wurde der Grundwasserstand innerhalb der abgedichteten Teilbaugrube bis unter das geplante Aushubniveau abgesenkt. Die Auswertung der Pumpversuche ergab einen

maximalen, flächenbezogenen Zufluss in die Teilbaugruben von ca. 0,2 bis 0,5 l/(s·1000 m²). Daher konnten kritische, einen Hydraulischen Grundbruch beim Baugrubenaushub verursachende Fehlstellen in der Sohldichtung auf Grund der bei den Pumpversuchen im Vergleich zum kritischen Zufluss durch einzelne Fehlstellen festgestellten geringen Zuflüssen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden (vgl. Bild 6).

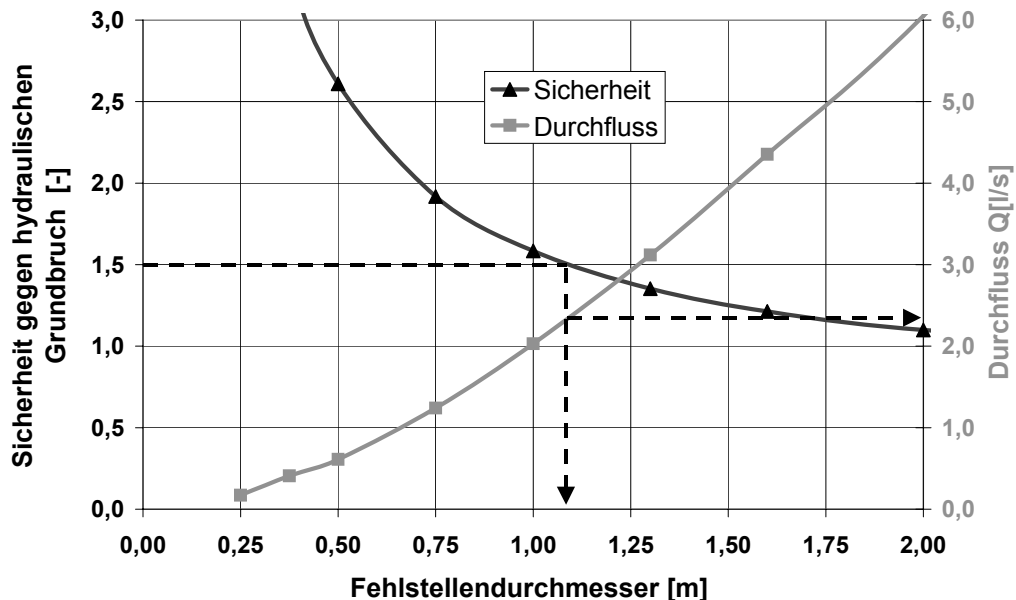


Bild 6: Kritischer Durchmesser für bodengefüllte Fehlstelle

3 Wassereintritte in die Baugrube

Der vorletzte Teilaushub der Baugrube erfolgte bis zum Übergang vom Mergel zu den Unteren Sanden. Während dieses Teilaushubs kam es zu einem Wasseraustritt am Böschungsfuß, wobei zunächst sichtbar Boden ausgetragen wurde. Die Ausflussrate wurde zu etwa 180 m³/h geschätzt. Da der Austrag von Boden an der Austrittsstelle nicht mit Sicherheit gestoppt werden konnte und die bestehende Schleuse möglicherweise durch die andauernde Grundwasserabsenkung gefährdet war, musste die Baugrube geflutet werden. Bild 7 zeigt den Wasserzutritt schematisch im Querschnitt.

Zur Lokalisierung des Lecks wurde der Aushub in der gefluteten Baugrube unter Wasser fortgesetzt und dazu im Bereich der Austrittsstelle der Geschiebemergel ausgehoben. Danach wurde die Baugrube schrittweise gelenzt und versucht, mit verschiedenen Messverfahren das Leck zu orten. Dabei wurde angenommen, dass das Leck mit zunehmendem Wasserdruck wieder aktiviert wird und erneut Grundwasser in die Baugrube einströmt. Erstaunlicherweise hatte sich aber während der Flutung der Baugrube das Leck offensichtlich so weit gedichtet, dass selbst nach dem kompletten Lenzen der Baugrube kein Wasserzutritt mehr festgestellt werden konnte. Auch eine weitere Lecksuche mit zeitweisem Aushub bis NN + 30 m blieb erfolglos. Allerdings wurden bei diesem Aushub Teile von Düskerzen mit mittigen hohlen Strömungskanälen gefunden, deren Wirkung weiter unten beschrieben wird. Die Arbeiten wurden unter einem verschärften Sicherheitskonzept fortgesetzt.

Einige Tage nach Fortsetzung der Arbeiten trat in unmittelbarer Umgebung des vorherigen Wasserzutritts schlagartig erneut Wasser in die Baugrube ein, wobei ungefähr 1 Tag vorher von NN +32 m auf NN +29,6 m ausgehoben worden war. Die Austrittsstelle wurde sofort mit Geotextil belegt und anschließend mit Kies und Sand überschüttet, bis ein stabiler Zustand erreicht war. Das durch die Aufschüttung in die Baugrube einströmende Wasser wurde abgepumpt. Nachfolgend durchgeführte Sondierungen zeigten eine Auflockerung der Sande unter der DSV-Sohle über ca. 1 m Höhe. Die Leckage wurde von einer Aufschüttung aus, die bis kurz über die Druckhöhe des Grundwassers außerhalb der Baugrube

reichte, saniert. Zuerst wurde Quarzsand von unten in die Fehlstelle eingespült, der durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit in dem Strömungskanal im Wasser mitgeschleppt wurde und somit nach und nach den Strömungskanal füllte. Durch diese Maßnahme konnten die eintretenden Wassermengen bereits erheblich reduziert werden. Anschließend wurde Zementsuspension und Weichgel injiziert.

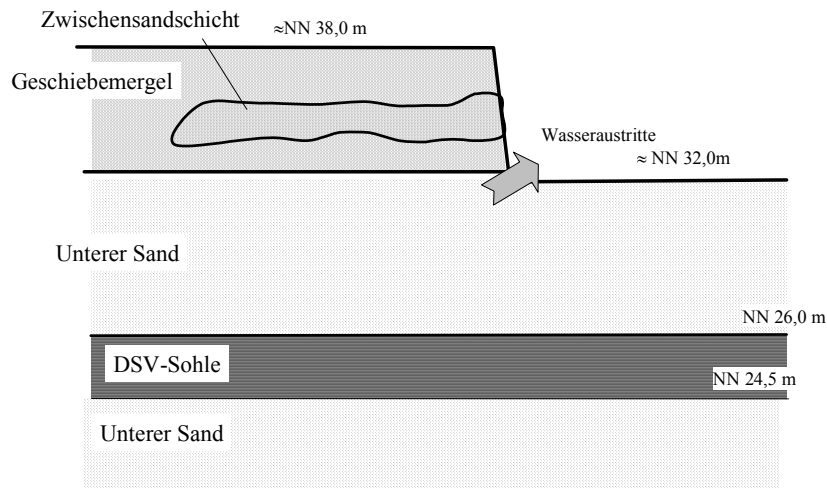


Bild 7: Situation beim Wasserzutritt

Nach Beendigung der Sanierung wurde die Aufschüttung abgetragen. Hierbei war auf einem Niveau von ca. NN +30 m der in den Strömungskanal eingespülte Quarzsand zu erkennen (s. Bild 8).



Bild 8: Quarzsand im Strömungskanal

In unmittelbarer Nähe des Quarzsandes wurde mit Rammsondierung eine Auflockerungen bis ca. 1 m über die DSV-Sohle festgestellt. Weitere Sondierung im Abstand von 0,5 bis 1 m zeigten bereits mitteldichte bis dichte Lagerung der Sande.

4 Strömungskanäle als mögliche Ursache der Wassereintrüche

4.1 Strömungskanäle in Düskerzen

Wie bereits oben beschrieben, wurden bei der Suche nach der Leckage DSV-Kerzen gefunden, die in ihrer Achse Hohlräume mit einem Durchmesser von 1 cm bis zu 1 dm aufwiesen (siehe Bild 9). Die Hohlräume waren zwischen einigen dm bis zu wenigen m lang. Es wurde u. a. ein Kerze gefunden, deren Hohlraum bis ca. $\frac{1}{2}$ m oberhalb der DSV-Sohle mit einem Bewehrungsseisen befahrbar war (Länge ca. 3,5 m).



Bild 9: DSV-Kerzen mit Hohlräumen

Im Zuge des weiteren Aushubes wurden einige DSV-Kerzen einer genaueren Betrachtung unterzogen. Hierbei zeigte sich, dass 4 verschiedene „Klassen“ der Kerzen vorhanden sind, von denen jeweils mehrere Kerzenabschnitte angetroffen wurden:

- Kerzen mit im Querschnitt durchgehend hoher DSV-Festigkeit,
- Kerzen mit im Zentrumsbereich (\varnothing ca. 5 – 12 cm) hellerem DSV-Material mit geringer Festigkeit
- Kerzen mit einer flüssigen Sand-Zement-Wasser-Mischung oder Sand-Wasser-Mischung im Zentrumsbereich (\varnothing ca. 5 cm),
- Kerzen mit einem Hohlraum im Zentrumsbereich (\varnothing ca. 1 – 10 cm).

4.2 Hydraulische Wirkung von Strömungskanälen

Auf Grund der Ergebnisse der Pumpversuche und der durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung der Sohldichtung konnten sandgefüllte, kritische Fehlstellen mit einem Durchmesser von mehr als 1 m als Ursache für die Wasserzutritte weitgehend ausgeschlossen werden. Der Durchfluss und die Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch werden bei sandgefüllten Fehlstellen maßgeblich durch den hohen Potenzialabbau im Bereich der Fehlstelle in der Sohle bestimmt. Auf Grund der in einzelnen DSV-Säulen und -Kerzen festgestellten Hohlräume konnte jedoch von der Existenz durchgehender, nicht sandgefüllter Strömungskanäle in der Sohldichtung ausgegangen werden. Um den Einfluss dieser hohlen Strömungskanäle zu untersuchen, wurden numerische Berechnungen mittels einem vereinfachten rotationssymmetrischen Modell durchgeführt (Bild 10).

Abgebildet wurde die Situation vor dem zweiten Wassereintruch mit einem innerhalb der Baugrube auf NN +29,5 m abgesenkten Grundwasserstand und einem Aushubniveau von ca. NN +32 m. Dabei wurde ein vertikaler, unterhalb der Aushubebene endender Strömungskanal mit einem konstanten Durchmesser von 0,1 m von der Unterkante der DSV-Sohle bis zur Oberkante der DSV-Kerze angenommen. Die Länge L des Strömungskanals bzw. die Dicke z der darüber verbleibenden Bodenüberdeckung wurde variiert. In Bild 11 sind wiederum die Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch (schwarze Linie) und der resultierende Durchfluss (graue Linie) dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei diesen Randbedingun-

gen mit einem durchgehenden hohlen Strömungskanal mit einem Durchmesser von lediglich 10 cm eine Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch von $\eta = 1$ erst bei einer Bodenüberdeckung von ca. 4 m erreicht wird. Der Durchfluss durch den hohlen Strömungskanal ist nur in relativ geringem Maß von der Überdeckungshöhe der Ausflussebene abhängig und beträgt ca. 0,6 – 0,7 l/s.

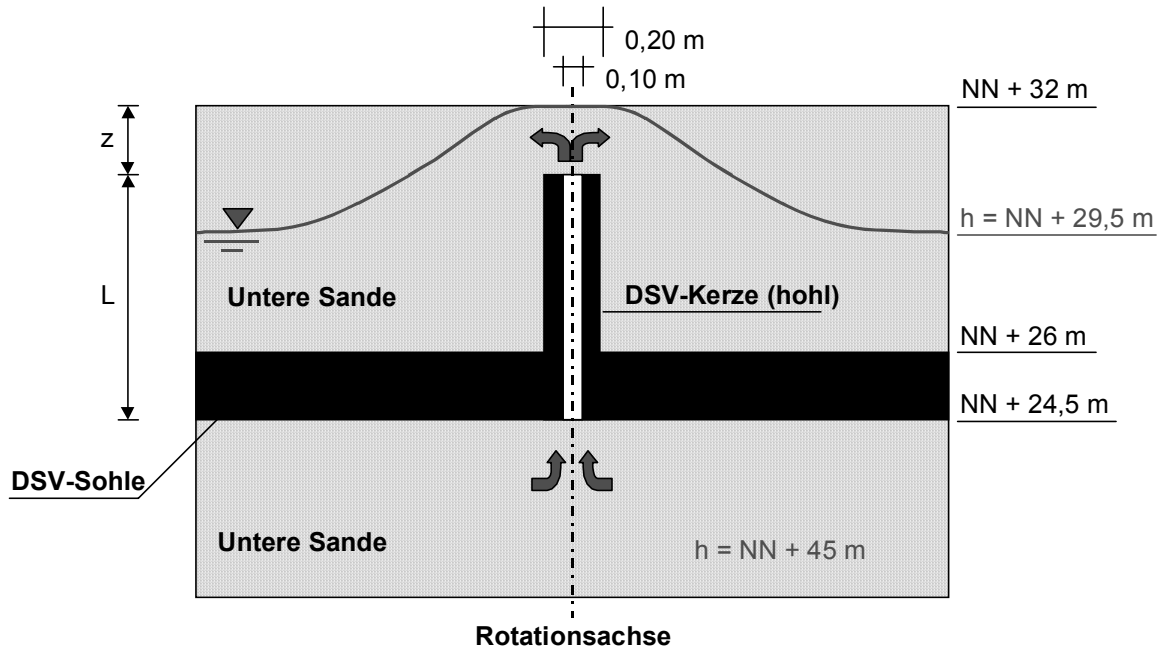


Bild 10: Wasserzutritt durch eine hohle, nicht sandgefüllte DSVI-Säule und -Kerze

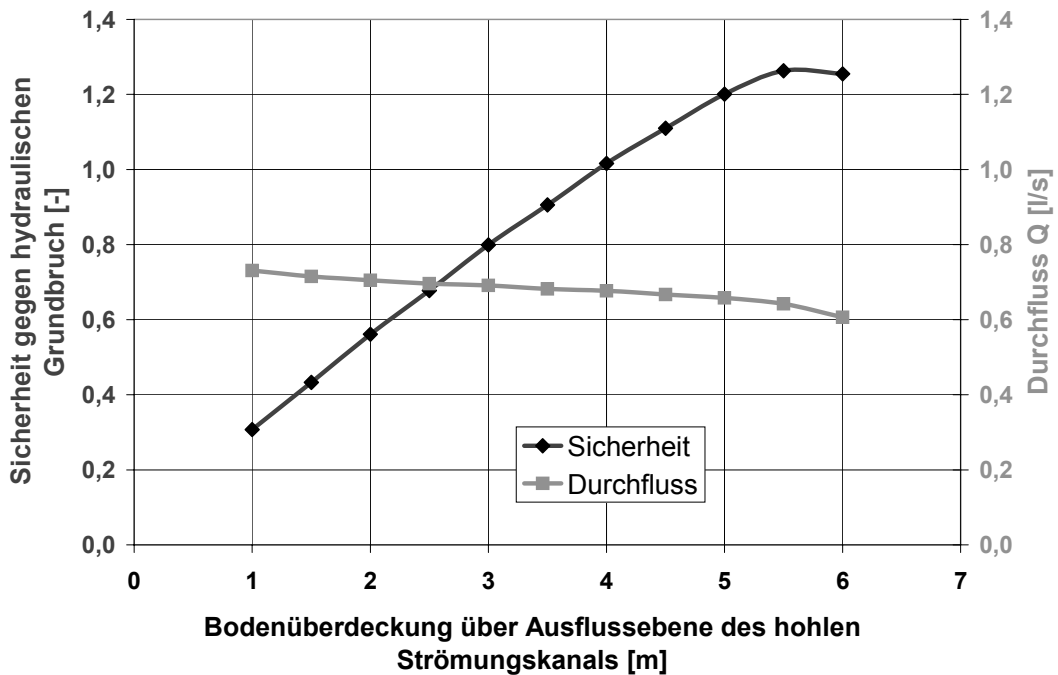


Bild 11: Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch über einer hohlen, nicht sandgefüllten DSV-Kerze

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass bereits bei der Überprüfung der Sohldichtung mittels Pumpversuch ein derartiger in den Unteren Sanden endender, an der Oberkante offener und nicht sandgefüllter Strömungskanal existiert hat, da ein konzentrierter Wasserzufluss in o. g. Größenordnung beim Pumpversuch wahrscheinlich festgestellt worden wäre. Vielmehr ist anzunehmen, dass der Strömungskanal zunächst keine Verbindung zu den Unteren Sanden oberhalb der Sohldichtung hatte und erst infolge der Reduzierung der Auflast beim Aushub der Baugrube ein Aufbruch des Strömungskanals stattgefunden hat.

4.3 Entstehung von Strömungskanälen

Wichtig für die Schadensanalyse ist die mögliche Entstehung der Strömungskanäle. Es ist davon auszugehen, dass in einer DSV-Sohle herstellbedingt fuchsgangartige Kanäle mit mehreren cm Durchmesser entstehen, z. B. infolge Düsschatten. Diese sind zunächst mit Sand gefüllt, daher bei kleinem Durchmesser hydraulisch kaum wirksam (vgl. Bild 6) und auch in Pumpversuchen nicht detektierbar.

Hohlräume können dagegen auf und über der DSV-Sohle entstehen. Während und nach dem Produktionsprozess laufen im flüssigkeitsgefüllten Hohlraum (DSV-Sohle mit Kerze) folgende Prozesse ab (vgl. Bild 12).

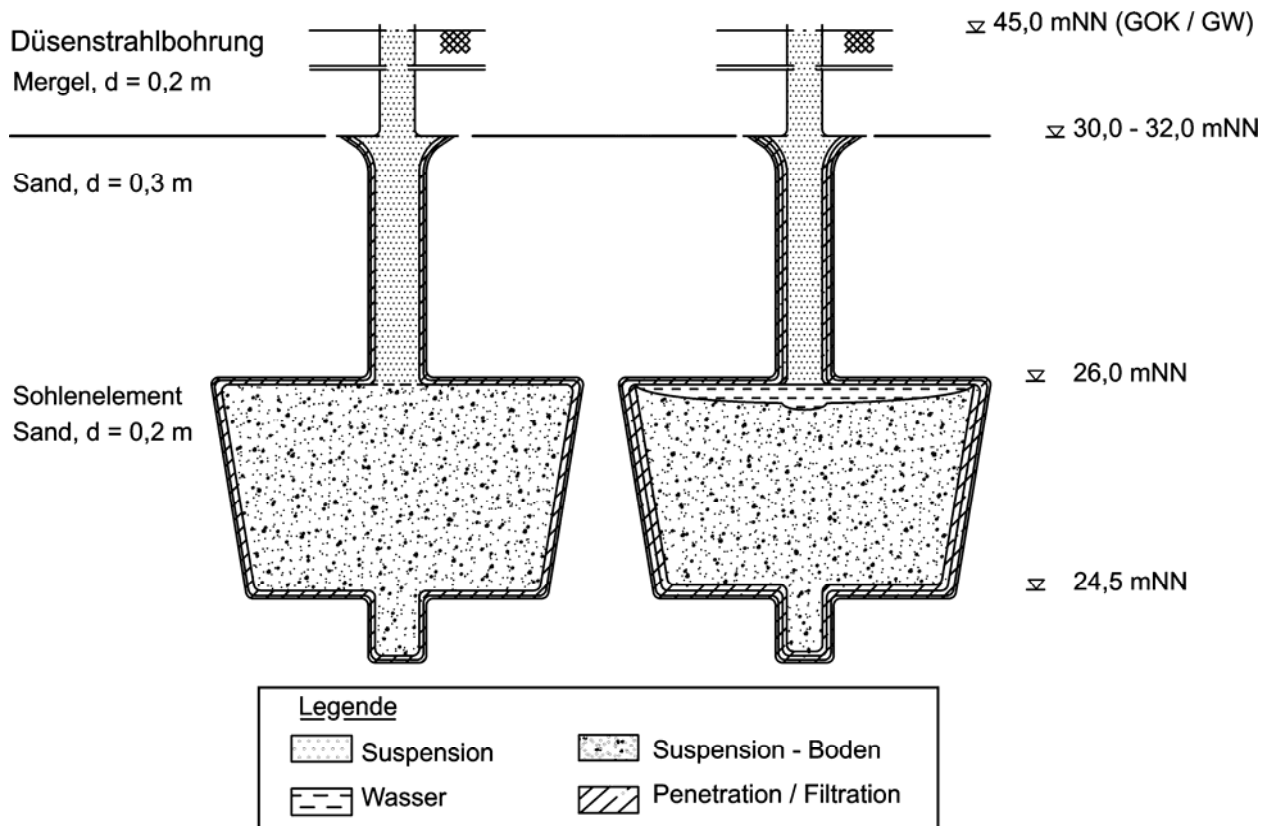


Bild 12: Filtration und Sedimentation in flüssigem DSV-Material

Nach der Herstellung einer Säule ist das DSV-Material flüssig und steht unter einem hydrostatischen Überdruck von ca. 1,5 - 2 bar. Durch diesen Überdruck filtert Wasser in den umgebenden Sand ab und Suspension dringt in den Sand ein. Beim Abfiltern konzentriert sich Feststoff und insbesondere Zement an der Grenzschicht Boden/Suspension. So entsteht an der Grenzschicht Düsenstrahlsuspension – Boden relativ schnell eine sehr feste Schale von wenigen cm Dicke (vgl. Bild 12, „Penetration, Filtration“). Infolge der Filtration wachsen die zunächst mit Flüssigkeit gefüllten Hohlräume insbesondere in den Kerzen zu.

Mit Abschluss des Düsens beginnt die Sedimentation. Bei der Sedimentation sinken Feststoffe (Boden/Zement) in der Suspension ab, während sich im oberen Bereich wasserreiche Suspension bzw. Wasser absetzt.

Parallel zur Filtration und zur Sedimentation steift in der DSV-Kerze die Suspension an. Die ansteifende Suspension bildet in der schlanken Bohrung im Mergel ($\varnothing < 0,2 \text{ m}$) eine Art „Stopfen“, der das Nachfließen der Suspension von oben, zumal bei reduziertem hydrostatischem Druck (s. o.), verhindert ('Partielle Sedimentation'). Aus dem Zentrum der unter dem „Stopfen“ liegenden DSV-Kerze kann (zäh)flüssige Suspension (Dichte bis $2,0 \text{ t/m}^3$) in einem Umwälzungsprozess (s. u.) in das Wasserreservoir (Dichte $\approx 1,1 \text{ t/m}^3$ infolge Sedimentation) eindringen ('fingering' [SCHEIDEGGER, 1960]) und wird durch Wasser bzw. wasserreiche Suspension ersetzt (s. Bild 13). In der DSV-Kerze entsteht ein Schlot.

Das Volumen des Reservoirs über einer Säule ($\varnothing 2 \text{ m}$) beträgt bei einem Absetzmaß von 5 % ca. 240 l. Bei einer „frisch-in-frisch“-Produktion kann das Volumen entsprechend größer sein. Das Volumen eines Schlotes mit einem Durchmesser von 10 cm beträgt etwa 8 l/m. Theoretisch könnte also ein $240/8 = 30 \text{ m}$ langer Schlot mit Wasser aus dem Reservoir gefüllt werden. Die Länge des Schlotes wird also durch Lage des durch die ansteifende Suspension gebildeten „Pfropfens“ in der Kerze, durch die Geometrie der DSV-Säule und der Kerze und durch die Herstell(zeit)folge bestimmt.

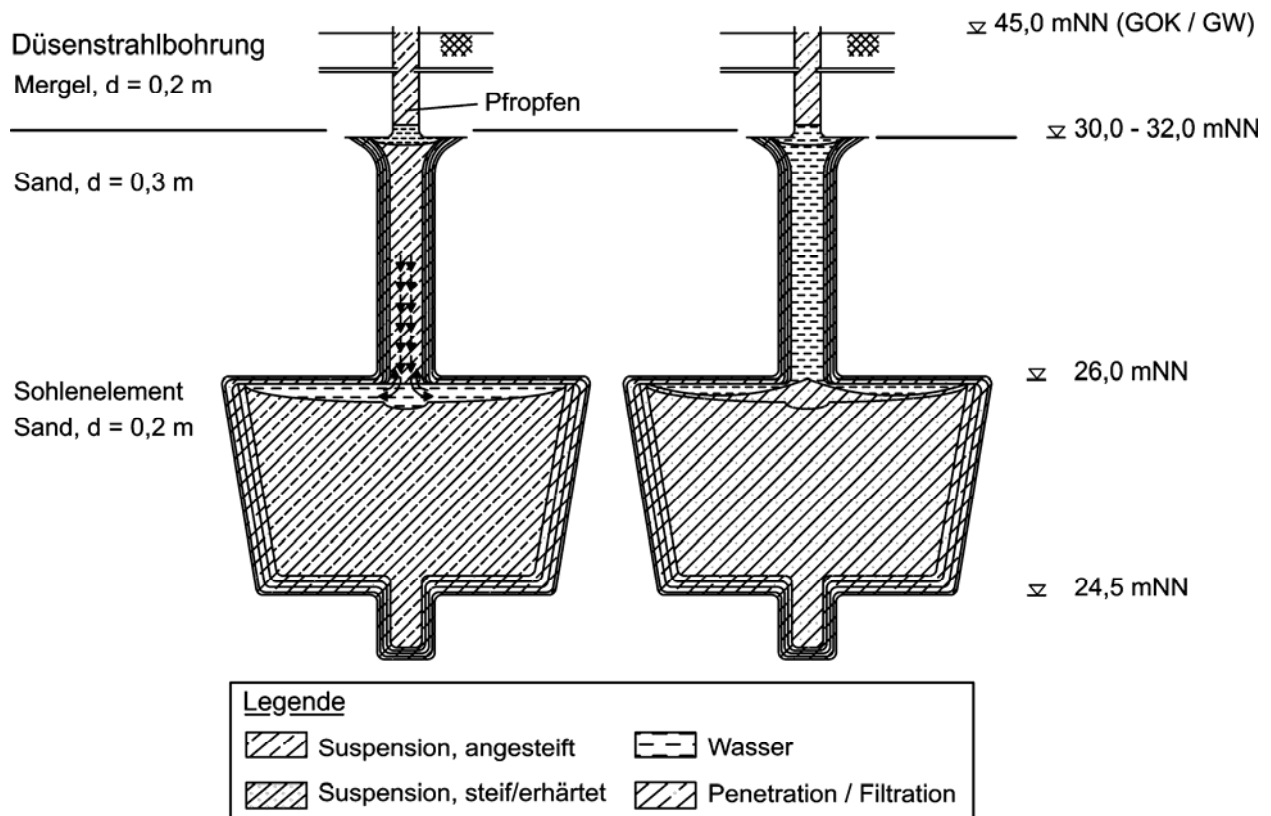


Bild 13: Umwälzprozess in der Suspension

Solange das von festem Düsenstrahlmaterial (unten) und dünnem Filterkuchen (oben) umschlossene Reservoir kein Wasser abgibt, ist es mechanisch stabil. Wasserverluste können beim Aushub durch das Freilegen von Schloten oder durch das Brechen des sehr festen Filterkuchens bei aushubbedingter Belastung der DSV-Sohle entstehen.

Damit wird dann auch ein möglicher Fuchsgang durchströmt und dabei die Sandfüllung in den oberhalb liegenden Hohlraum erodiert. So entsteht ein von unten nach oben durchgängiger hohler Strömungskanal.



4.4 Erklärung für die Wasserzutritte in die Baugrube

Die zwei aufgetretenen Leckagen lassen sich mit den o. g. Mechanismen folgendermaßen erklären:

1. Bei der Herstellung der DSV-Sohle verblieb eine sandgefüllte Fehlstelle in der Sohle, die über die gesamte Sohlenhöhe reichte.
2. Durch Abfiltern und Sedimentation konnten zum einen an der Oberseite der DSV-Körper wassergefüllte Hohlräume entstehen, die durch die feste Schale der abgefilterten Suspension zum darüberliegenden Sand abgedeckt wurden. Je nach Herstellbedingungen konnte dieser Hohlraum auch in die DSV-Kerzen reichen und einen Schlot bilden.
3. Wenn ein wassergefüllter Hohlraum an der Oberseite der DSV-Säule und eine Fehlstelle Kontakt haben, wirkt der unter der DSV-Sohle herrschende Wasserdruck auch in dem wassergefüllten Hohlraum. Beim Baugrubenaushub von NN +38 m auf NN +32 m wurde durch die Verformung der Sohle die feste Schale der abgefilterten Suspension und damit die Abkapselung des unter hohem Wasserdruck stehenden Hohlräume zerstört
4. Dadurch konnte sich der Wasserdruck aus dem wassergefüllten Hohlraum in den Sand über der DSV-Sohle entspannen und die so entstehende Strömung spült den Sand aus der Fehlstelle in den Hohlraum. Nach Freispülung des Strömungskanals in der DSV-Sohle nahm der hydraulische Gradient zu und die Durchflussmenge stieg an, bis das Grenzgleichgewicht zwischen Strömungskraft und Auflast überschritten wurde und ein Hydraulischer Grundbruch im tief liegenden Bereich der Baugrube mit Materialtransport durch Erosion von Sand unterhalb der DSV-Sohle verursacht wurde.
5. Nach dem Fluten der Baugrube wurde ungefähr ein Potenzialausgleich zwischen dem Grundwasser außerhalb der Baugrube und dem Wasser in der Baugrube hergestellt, wodurch der Zufluss durch den freigespülten Strömungskanal versiegte.
6. Im Laufe der Flutung der Baugrube wurde die Strömungsgeschwindigkeit in dem Erosionskanal so gering, dass sie die Sinkgeschwindigkeit der Sandkörner unterschritt. Dadurch konnte Sand von oben in den Erosionskanal fließen und ihn zumindest teilweise füllen, solange ausreichend Material zur Verfügung stand. Die Füllung mit Sand verursachte eine Abdichtung des Strömungskanals, so dass auch nach Lenzen der Baugrube und Abgrabung bis auf NN +32 m kein merklicher Wasserzutritt festgestellt werden konnte.
7. Durch den Abtrag von NN +32 m auf ca. NN +30 m wurde die Auflast über dem (teil)verfüllten Strömungskanal weiter reduziert. Dadurch wurde das Grenzgleichgewicht zwischen Strömungskraft und Auflast überschritten und es kam zu einem erneuten Hydraulischen Grundbruch mit Freispülung des Strömungskanals. Da unterhalb der DSV-Sohle bereits ein größerer Hohlraum existierte, führte der Hydraulische Grundbruch zu einem plötzlichen Wasseraustritt mit hoher Intensität.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Zuge der Herstellung der Baugrube für die Schleuse Uelzen I kam es durch die horizontale Düsenstrahlsohle zu Wassereinbrüchen in die Baugrube. Die wahrscheinliche Ursache für die Wasserzutritte war zunächst eine Fehlstelle, die über die gesamte Höhe der DSV-Sohle reichte. Diese Fehlstelle hatte Verbindung mit einem wassergefüllten Hohlraum, der durch Abfiltern und Absetzen der Suspension über den DSV-Körpern entstehen und der auch teilweise als vertikaler Schlot in die DSV-Kerzen hineinreichen kann. In den Hohlraum ist Sand aus der Fehlstelle in der Sohle erodiert. Durch den so entstandenen, nicht sandgefüllten Strömungskanal (Fuchsgang) konnte das unter hohem Druck stehende Wasser nahezu widerstandslos fließen und dadurch einen Hydraulischen Grundbruch erzeugen. Nach Flutung der Baugrube füllte sich der Strömungskanal mit Sand und dichtete sich. Durch weiteren Bodenaushub wurde die Sandüberdeckung reduziert, wodurch das Grenzgleichgewicht zwischen Strömungskraft und Auflast überschritten wurde. So entstand ein Hydraulischer Grundbruch an derselben Stelle, an der sich bei der vorhergehenden Leckage bereits eine bevorzugte Wasserwegsamkeit eingestellt hatte. Dadurch wurde der alte Strömungskanal und der zugehörige, durch Materialausttrag gebildete Hohlraum unter der DSV-Sohle wieder aktiviert



Ursächlich für die Wasserzutritte können Hohlräume in der DSV-Sohle und den DSV-Kerzen sein, die auf das Sedimentations- und Filtrationsverhalten der Suspension zurückzuführen sind. Zukünftig sollte bei entsprechenden hydraulischen Randbedingungen geprüft werden, welche Sedimentations- und Filtrationsbedingungen vorliegen.

Es ist ggf. erforderlich, das Absetzmaß der Zementsuspension auf ein Maß von unter 5 % nach 24 Stunden zu beschränken.

Literatur

Bieberstein, A., J. Herbst & J Brauns (1999): „Hochliegende Dichtungssohlen bei Baugrubenumschließungen; Bemessungsregel zur Vermeidung von Sohlaufbrüchen im Bereich von Fehlstellen“, geotechnik 22 (2).

E. Scheidegger (1960): „The Physics of Flow Through Porous Media“, University of Toronto Press.