

Hoch hinauf oder tief hinunter – Querungen der Unterelbe

Gerhard Zehetmaier, Per Dost

WTM Engineers, Hamburg

Zusammenfassung: Die Unterelbe verbindet den Hamburger Überseehafen mit der Nordsee, trennt Lebensräume voneinander und ist ein schwer zu überwindendes Hindernis. Elbquerungen sind stets herausfordernde Großprojekte, die stromabwärts der Hamburger Elbbrücken bislang nur durch Tunnelbauwerke realisiert wurden. Der Beitrag beschreibt anhand aktueller Beispiele, u.a. der Elbquerung für den SuedLink, wie planerisch den schwierigen Randbedingungen begegnet werden kann.

1 Hintergrund

Als Unterelbe wird der etwa 140 km lange Unterlauf der Elbe zwischen der Staustufe Geesthacht und der Elbmündung bei Cuxhaven bezeichnet (Abb. 1). In diesem Abschnitt unterliegt die Elbe dem Einfluss von Ebbe und Flut; der mittlere Tidenhub am Pegel St.Pauli beträgt rund 3,8 m. Auf einer Strecke von etwa 109 km, bis zu den Hamburger Elbbrücken, ist die Unterelbe von Hochseeschiffen befahrbar und verbindet den Hamburger Hafen, einen der größten Häfen Europas, mit der Nordsee. Durch ihre Funktion als Verkehrsweg und durch ihre enorme Breite – bei Glückstadt ist der Strom 3 km breit – trennt die Elbe Lebensräume und ist ein schwer zu überwindendes Hindernis. Derzeit existiert zwischen dem Hamburger Elbtunnel der BAB A7 und der Mündung in die Nordsee keine feste Straßen- oder Eisenbahnquerung, lediglich einige Versorgungsleitungen kreuzen den Strom. Trotz der äußerst herausfordernden Randbedingungen werden derzeit mehrere Querungen der Unterelbe geplant oder befinden sich im Bau; alle als Tunnelbauwerk (vgl. [1]).

2 Randbedingungen

Entscheidende Randbedingungen für Elbquerungen ergeben sich einerseits aus der Funktion des Stroms als Seeschiffahrtsstraße, andererseits aus den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten der Elbmarsch.



Abbildung 1: Unterelbe zwischen Geesthacht und der Mündung (Bild: WTM Engineers)

Bis zum Hamburger Hafen ist die Elbe für Containerschiffe der Megamax-Klasse befahrbar, den derzeit größten im Einsatz befindlichen Frachtschiffen (Länge ca. 400 m, Breite ca. 61 m; Fracht > 20.000 TEU / 20-Fuß Standard-Container). Dafür beträgt die Solltiefe der Fahrrinne 17,3 m bei einer Breite von mindestens 250 m [2]. Die erforderliche Durchfahrtshöhe für die Containerschiffahrt liegt heute bei mehr als 70 m (vgl. Stonecutters Bridge, Hongkong: 73,5 m).

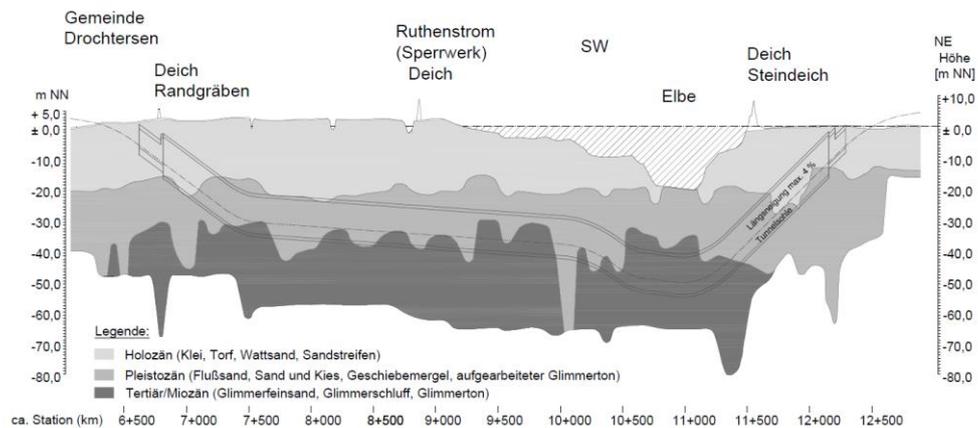


Abbildung 2: Geologischer Längsschnitt Elbquerung A20 bei Glückstadt (aus [1])

Geologisch wird die Unterelbe durch die nacheiszeitlich entstandene Elbmarsch geprägt – exemplarisch anhand der Elbquerung der BAB A20 dargestellt in Abb. 2. Die Geländeoberfläche der Marsch liegt etwa auf Höhe des Meeresspiegels; lediglich in Bereichen intensiver Nutzung wie z. B. im Hamburger Hafen stehen darüber teils mehrere Meter mächtige Auffüllungen an. Die anstehenden Marschböden bestehen aus holozänen organischen Weichschichten großer Mächtigkeit. Durch intensive Vegetation und die Entstehung von Mooren einerseits und die Ablagerung von Trübstoffen und Schlick in

Überflutungsgebieten des Elbe-Urstromtals andererseits haben sich Torf- und Wattsandlagen sowie vor allem Kleischichten mit Mächtigkeiten bis zu 20 m gebildet. Darunter stehen eiszeitliche (pleistozäne) Schmelzwassersande und -kiese der letzten Eiszeit sowie Lauenburger Tone, Beckensande und Geschiebemergel früherer Kaltzeiten an, teils mit eingelagerten Findlingen und Blöcken. Unterliegend, in großer Tiefe sind mächtige tertiäre Glimmerschluffe und -tone anzutreffen. Grundwasser steht in der Regel geländenah an; in den eiszeitlichen Sanden ist das Grundwasser gespannt und korrespondiert mit dem Wasserstand der Elbe.

3 Hoch hinauf – Hochbrücken

Auf dem von der Hochseeschifffahrt genutzten Stück der Unterelbe zwischen Hamburg und der Mündung wurden Hochbrücken bislang noch nicht realisiert. Die notwendige Durchfahrtshöhe von heute mehr als 70 m, die bei Straßenüberführungen Rampenbrücken von jeweils 1,5 bis 2 km Länge erforderlich machen würde, die erheblichen Spannweiten angesichts der Breite von Fahrrinne und Strom sowie der heterogene Baugrund, der stets eine Tiefgründung mindestens in den pleistozänen Sanden erfordert, machen Elbhochbrücken zu herausfordernden Großprojekten. In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden Überlegungen für eine Autobahn-Hochbrücke als Hängebrücke über die Elbe an der Stelle des heutigen Elbtunnels der BAB A7 angestellt, allerdings wurde das Bauwerk nie verwirklicht [3]. Die bislang einzige Hochbrücke an der Unterelbe bzw. am Köhlbrand, einem Teilstück der Süderelbe im Hamburger Hafen, ist die zwischen 1970 und 1974 errichtete Köhlbrandbrücke. Mit einer Durchfahrtshöhe von nur 51 m bei MHW (mittleres Tidehochwasser) stellt sie allerdings für die Containerschifffahrt zum stromaufwärts gelegenen Containerterminal Altenwerder eine Barriere dar. Darum und wegen der aufgetretenen Ermüdungsschäden soll sie in den 2030er Jahren ersetzt werden. Für die kontinuierliche Überwachung und Beurteilung des Bauwerkszustandes wurde die Brücke im Rahmen des SmartBridge-Hamburg-Projekts mit mehreren hundert Sensoren ausgestattet, deren Messergebnisse an einem digitalen Zwilling aggregiert dargestellt werden (vgl. [4]).

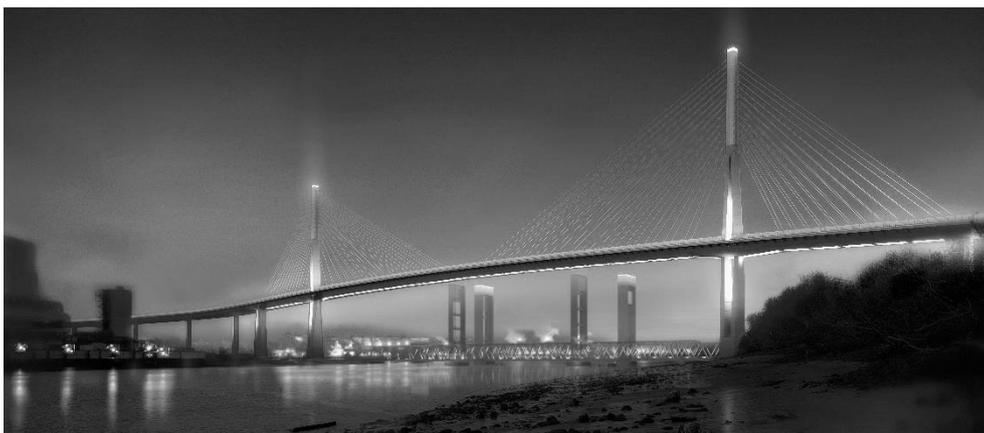


Abbildung 3: Süderelbquerung
(Bild: Planungsgemeinschaft Süderelbquerung – sbp | WTM Engineers | Dissing + Weitling)

Wenige Kilometer stromaufwärts bei Moorburg ist der Bau einer weiteren Schrägseilbrücke über die Süderelbe als Teil der Hafenpassage der BAB A26 geplant (Abb. 3). Der Entwurf, der 2013 als Sieger aus einem Wettbewerb hervorging, sieht eine integrale Schrägseilbrücke mit einer Spannweite von 535 m vor. Die nach heutigen Maßstäben kleine Durchfahrts Höhe von 53 m orientiert sich an den stromab gelegenen Kattwyck-Hubbrücken und stellt an der Stelle keine Einschränkung mehr für die Schifffahrt dar. Für die Gründung der Pylone sind aufwändige Pfahlgründungen mit jeweils 42 ca. 40 m langen, fußaufgeweiteten Bohrpfählen $D = 1,50$ m vorgesehen, zu deren Optimierung aktuell Pfahlprobelastungen durchgeführt werden.

4 Tief hinunter – Tunnelquerungen

4.1 Überblick und Herausforderungen

Derzeit sind mehrere Tunnelquerungen in Planung bzw. in Bau (vgl. [1]): Die Versorgungstunnel für die Anbindung des Hamburger Fernwärmesystems an die Wärmequellen im Hamburger Hafen (FWS West: 1,2 km langer Schildtunnel mit Innendurchmesser 3,7 m) sowie die Elbquerung des SuedLink bei Glückstadt (ElbX: 5,2 km langer Schildtunnel mit Innendurchmesser 4,0 m) befinden sich in Bau, während die Elbquerung der Küstenautobahn BAB A20 bei Glückstadt (5,3 km langes Tunnelbauwerk mit 2 parallelen Röhren im Schildvortrieb mit Innendurchmesser 12,2 m) noch in Planung ist. Wesentliche technische Herausforderungen für Tunnelquerungen der Elbe sind:

- heterogener Baugrund und hoch anstehendes, teils tideabhängiges und gespanntes Grundwasser (vgl. Abschnitt 2 und Abb. 2)
- große Wassertiefen im Bereich der Fahrrinne mit tideabhängig variierendem Wasserstand, entsprechend große Tiefenlage der Tunnel (Tunneloberkante bei ElbX minimal bei -36 m NHN; bei A20 < -40 m NHN; NHN = Normalhöhennull) und damit hohen erforderlichen Stützdrücken bei maschinellem Tunnelvortrieb
- Hochwasserschutz des Bauwerks und gleichermaßen des Deichhinterlands angesichts wiederkehrender Sturmflut- und Hochwasserereignisse

Der planerische Umgang mit den genannten Herausforderungen soll am Beispiel des Querungsbauwerks ElbX für den SuedLink beleuchtet werden.

4.2 Elbquerung ElbX

4.2.1 ElbX und SuedLink – Überblick

SuedLink bezeichnet eine rund 700 km lange Kabeltrasse aus HGÜ-Leitungen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung), die vorrangig Windstrom, der im Norden Deutschlands erzeugt wird, nach Süddeutschland transportieren und dabei eine Leistung von ca. 4 GW übertragen sollen. Bauherr der Querung der Unterelbe nördlich Glückstadt – kurz als „ElbX“ bezeichnet – ist der Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO. Für den ElbX zwischen Wewelsfleth (Schleswig-Holstein) und Wischhafen (Niedersachsen) wird ein Bauwerk aus zwei etwa 25 m tiefen Schächten jeweils im Deichhinterland mit

anschließenden Muffenbauwerken zur Anbindung der Kabel sowie ein ca. 5,2 km langer, begehbare Schildtunnel, der von Wewelsfleth aus aufgeföhren wird, erstellt (Abb. 4).

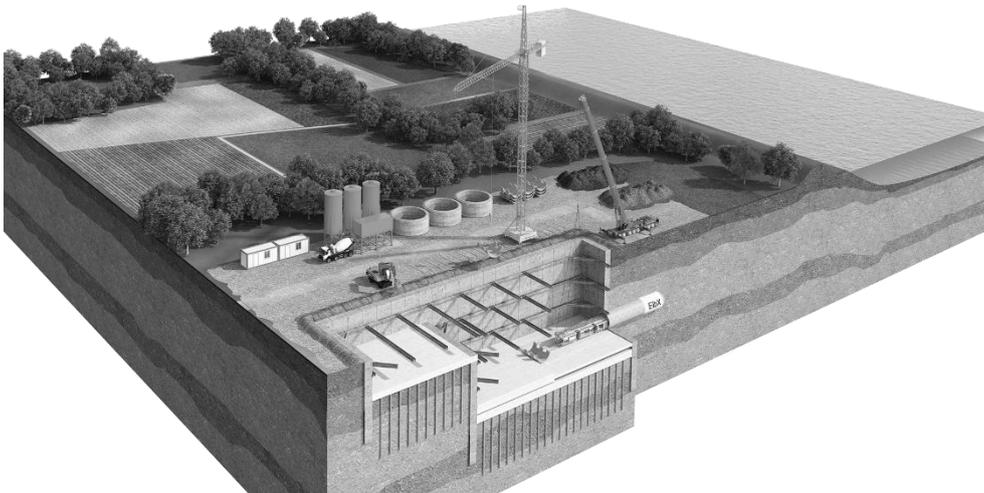


Abbildung 4: ElbX – Schachtbauwerk (Startschacht) in Wewelsfleth, Schleswig-Holstein und Schildtunnel (Bild: TenneT TSO GmbH)

4.2.2 Start- und Zielschächte, Schachtbauwerke

Die Baugrubenverbauten für Start- und Zielschacht des Schildvortriebs, die auch die späteren Schachtbauwerke für Zugang, Kabelzuföhren und Betriebstechnik aufnehmen, müssen baulichen, hydrogeologischen und baugologischen Anforderungen genügen. Insbesondere müssen sie wasserundurchlässig sein, die Ein- bzw. Aushubfenster zwischen den Steifenlagen sowie ausreichende lichte Höhe unterhalb der untersten Steifenlage zur Montage bzw. Demontage der Tunnelbohrmaschine (TBM) aufweisen. Eine Rückverankerung des Verbaus ist angesichts der anstehenden mächtigen Weichschichten nicht möglich.

Eine Besonderheit der Baugruben ergibt sich aus der Terminalsituation für das SuedLink-Vorhaben. Um die Gesamtbauteit zu verkürzen, ist vorgesehen, dass Schacht- bzw. Zugangsbauwerk gleichzeitig mit dem Tunnelvortrieb zu erstellen. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Länge einer Baugrube zur Beschickung des Tunnelbaus, der Schachtgröße und eines mit den Sicherheitsbehörden vereinbarten Sicherheitsstreifens zwischen beiden Gewerken wurde die Baugrube um 30 m verlängert und hat mit dem hochliegenden Baugrubenbereich für das Muffenbauwerk eine Gesamtlänge im Innenmaß von ca. 82 m (Startschacht Schleswig-Holstein, Abb. 4) bzw. ca. 70 m (Zielschacht Niedersachsen). Die Mehraufwendungen für die Vergrößerung der Baugrube werden durch die Zeitersparnis von ca. neun Monaten deutlich kompensiert.

Zur Sohlabdichtung der Baugruben kommen – geologisch bedingt – unterschiedliche Lösungen zum Einsatz. Bei der Zielbaugrube wurden ab einer Tiefe von 30 m unter GOK sehr mächtige Bodenschichten aus Lauenburger Ton und Glimmerton erkundet, die als

natürlich dichtende Schicht herangezogen werden können. Im Bereich der Startbaugrube konnten keine natürlich dichtenden Schichten erkundet werden; entsprechend wird die Baugrube mit einer rückverankerten Unterwasserbetonsohle zur Abdichtung der Baugrube ausgeführt.

Daraus ergeben sich deutlich unterschiedliche Bauteilabmessungen: Die Startbaugrube besteht aus 1,5 m dicken Schlitzwänden mit einer Länge von ca. 38 m (Abb. 5), die 2 m dicke Unterwasserbetonsohle ist mit ca. 30 m langen Mikropfählen rückverankert. Die Aussteifung erfolgt über fünf Steifenlagen. Demgegenüber sind die lediglich 1,2 m dicken Schlitzwände der Zielbaugrube ca. 50 m lang, um ausreichend tief in die dichtenden Schichten einzubinden. Die Aussteifung erfolgt dort über vier Steifenlagen.



Abbildung 5: ElbX - Schlitzwandarbeiten für das Schachtbauwerk in Wewelsfleth (Bild: Planungsgemeinschaft ElbX – WTM Engineers | BabEng; November 2023)

4.2.3 Schildvortrieb

Der zu wählende Tunnelquerschnitt hängt zunächst von den aufzunehmenden Versorgungsleitungen (hier Stromkabel) ab. Darüber hinaus sind Wirtschaftlichkeit, Minimierung von Ausbruchsvolumen und eingesetzten Baustoffen einerseits sowie – dazu gegenläufig – Anforderungen der Arbeitssicherheit zu beachten. Angelehnt an den DAUB-Leitfaden für Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Untertagebaustellen [5] wurde für den ElbX als optimaler Durchmesser DN 4000 gewählt, um ergonomisches Arbeiten unter Tage, Logistik und reibungslose Rettung bzw. Selbstrettung zu gewährleisten.

Mit entscheidend für den Schildvortrieb ist die Wahl des Verfahrens zur Ortsbruststützung (vgl. [6]). Hierzu sind folgende Aspekte relevant:

- Bedingt durch die Tiefenlage unter der Elbe werden Stützdrücke und auch Drucklufteinstiege über 4,0 bar erforderlich; gleichzeitig verändern sich die Stützdrücke mit den Gezeiten.

- Entlang der Tunnelstrecke werden stark unterschiedliche Böden durchfahren, unter anderem holozäne Wattsande, teils mit Kleilagen, pleistozäne Schmelzwassersande und -kiese, schluffige Sande und Lauenburger Ton. Dabei werden mit großer Wahrscheinlichkeit Findlinge und Blöcke angetroffen.
- Kohäsive, zur Verklebung neigende Böden kommen allerdings nur in untergeordnetem Maß vor.

Vor diesem Hintergrund fiel die Wahl auf eine TBM mit Flüssigkeitsstützung (Slurryschild). Da sich die erforderlichen Stützdrücke tideabhängig mit dem Wasserstand der Elbe verändern, werden Stützdruck und erforderlicher Druck bei Druckluftarbeiten (Reparaturen, Werkzeugwechsel am Schneidrad, Hindernisbeseitigung im Abbauraum, etc.) in Abhängigkeit des aktuellen Elbpegels eingestellt.

4.2.4 Hochwasserschutz

Der Hochwasserschutz hat für die Elbufergebiete besondere Bedeutung. Für die Berücksichtigung zukünftiger Hochwasserereignisse sind die Folgen des Klimawandels zu berücksichtigen; gemäß [7] erfolgt dies z.B. mit einem Klimazuschlag von 0,5 m bzw. 1,0 m auf den Bemessungswasserstand HW_{200} . Für Bau- und Betriebszustand ergeben sich verschiedene Szenarien, die planerisch umzusetzen sind, um den Hochwasserschutz jederzeit sicherzustellen.

Szenarien im Bauzustand:

- Havarie des Tunnels während des Vortriebs und in der Folge Eindringen von Wasser: Eine Überflutung durch Wasser, das über den Startschacht ins Deichhinterland austritt, muss vermieden werden. Maßgebend ist der Wasserspiegel der Elbe (ElbX: +6,5 m NHN; Maßnahmen: Schottung als Verschluss des Tunnels, alternativ Hochwasserschutzwand bis +6,5 m NHN am Startschacht).
- Deichbruch bei Hochwasser und in der Folge Eindringen von Wasser in den Startschacht: Solange der Tunnelvortrieb den Zielschacht noch nicht erreicht hat, besteht das Risiko einer Flutung des Tunnels mit gravierenden Auswirkungen auf die Vortriebstechnik (Szenario bei abgeschlossenem Vortrieb ähnlich Betriebszustand). Maßgebend ist der Wasserstand, der sich im Bereich des Startschachts nach einem Deichbruch einstellt (ElbX: ca. 2,5 m NHN; Maßnahme: Umlaufende Hochwasserschutzwand an Start- und Zielschacht)

Szenarien im Betriebszustand:

- Versagen des Tunnels und Eindringen von Wasser: Eine Überflutung der beiden Deichhinterländer ist auszuschließen. Maßgebend ist der Elbwasserstand. (Szenario für ElbX als äußerst unwahrscheinlich ausgeschlossen)
- Deichbruch bei Hochwasser: Ein Eindringen von Wasser und insbesondere eine Überflutung des gegenüberliegenden Deichhinterlands (Tunnel als kommunizierende Röhre) ist auszuschließen. Maßgebend sind die sich bei Deichbruch einstellenden Wasserstände an den Tunnelportalen bzw. an den Schachtbauwerken. (ElbX: ca. 2,5 m NHN; Maßnahme: Bauwerk bis zu dieser Kote hochwassersicher, u.a. durch druckwasserdichte Türen)

5 Schlussbemerkung

Querungen insbesondere im Bereich der Unterelbe westlich der Hamburger Elbbrücken, also in dem Abschnitt des Stroms, der für die Hochseeschifffahrt tauglich ist, sind stets herausfordernde Großprojekte und werden heute ausnahmslos als Tunnelbauwerke realisiert. Dabei treffen vielfältige Herausforderungen für den Tunnelbau aufeinander: große Wassertiefen mit Solltiefen in der Fahrrinne von mindestens 17 m, Tideeinfluss und Hochwasserszenarien, schwierige und äußerst heterogene Böden sowie große Strombreiten von mehreren Kilometern zwischen den Deichen. Das Beispiel ElbX zeigt allerdings, dass auch Elbquerungen für kritische Infrastruktur wirtschaftlich als Tunnel hergestellt werden können. Weitere Versorgungstunnel insbesondere für Übertragungsnetze und HGÜ-Übertragungen sind bereits in Planung; in unmittelbarer Nähe zum ElbX wird in wenigen Jahren die Elbquerung der HGÜ-Verbindung Korridor B aufgefahren.

Literatur

- [1] BABENDERERDE, T.; DOST, P.; ERDMANN, P.; HENZINGER, M.; KARPA, G.; ZEHETMAIER, G. Elbquerungen – Tunnelbau unter herausfordernden Bedingungen. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2024. Berlin, Ernst & Sohn. 2023
- [2] PORT OF HAMBURG: Die Fahrrinne ist bereit für tiefergehende Schiffe. <https://www.hafen-hamburg.de/de/special/fahrinnenanpassung/> (Zugriff am 01.12.2023)
- [3] SCHÄCHTERLE, K.; LEONHARDT, F. Hängebrücken. Die Bautechnik (1940), Heft, 33, und (1941) Hefte 7, 12/13. Ernst & Sohn, Berlin.
- [4] HERBRAND, M.; WENNER, M.; ULLERICH, C.; RAUERT, T.; ZEHETMAIER, G.; MARX, S. Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit durch Bauwerksmonitoring – Probabilistischer Beulnachweis der Hamburger Köhlbrandbrücke. Bautechnik 98 (2021), H. 2, S. 93–104. <https://doi.org/10.1002/bate.202000094>
- [5] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN (DAUB) Leitfaden für Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Untertagebaustellen. Ausgabe 03.2022. <https://www.daub-ita.de/de/publikationen/empfehlungen/> (Zugriff am 01.12.2023)
- [6] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN (DAUB) Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen. Ausgabe 03.2021. <https://www.daub-ita.de/de/publikationen/empfehlungen/> (Zugriff am 01.12.2023)
- [7] MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT, NATUR UND DIGITALISIERUNG DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN [HRSG.] Generalplan Küstenschutz (GPK), Fortschreibung 2022.