

یا حق



دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی عمران
کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت

روش‌های ساخت

مدرس: امیر حسین اویسی اسکویی

نیمسال دوم سال تحصیلی ۹۵ - ۹۴



راههای عبور از گذرگاههای آبی

1. پل
2. تونل حفاری شده
3. تونل مستغرق
- و ...

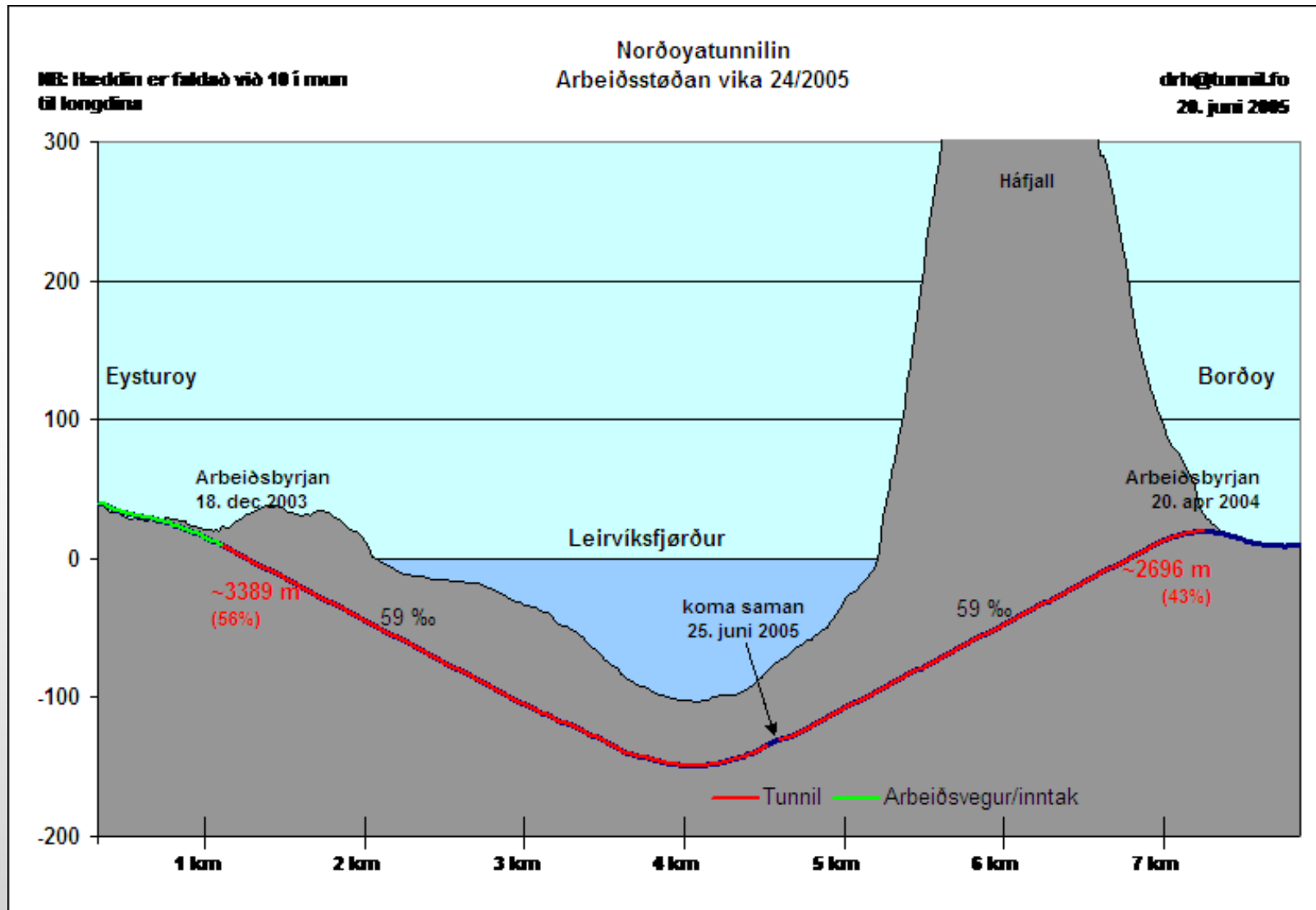
پل



پل



تونل حفاری شده (Bored Tunnel)



تونل مستغرق (Immersed tunnel)



تونل مستغرق (Immersed tunnel)

تعریف: تونل مستغرق یک نوع تونل زیر آبی است که متشکل از قطعات مجزا و پیش ساخته است که این قطعات شناور شده و به محل انتقال پیدا می کنند و سپس در آب فرو داده و نصب می شوند.

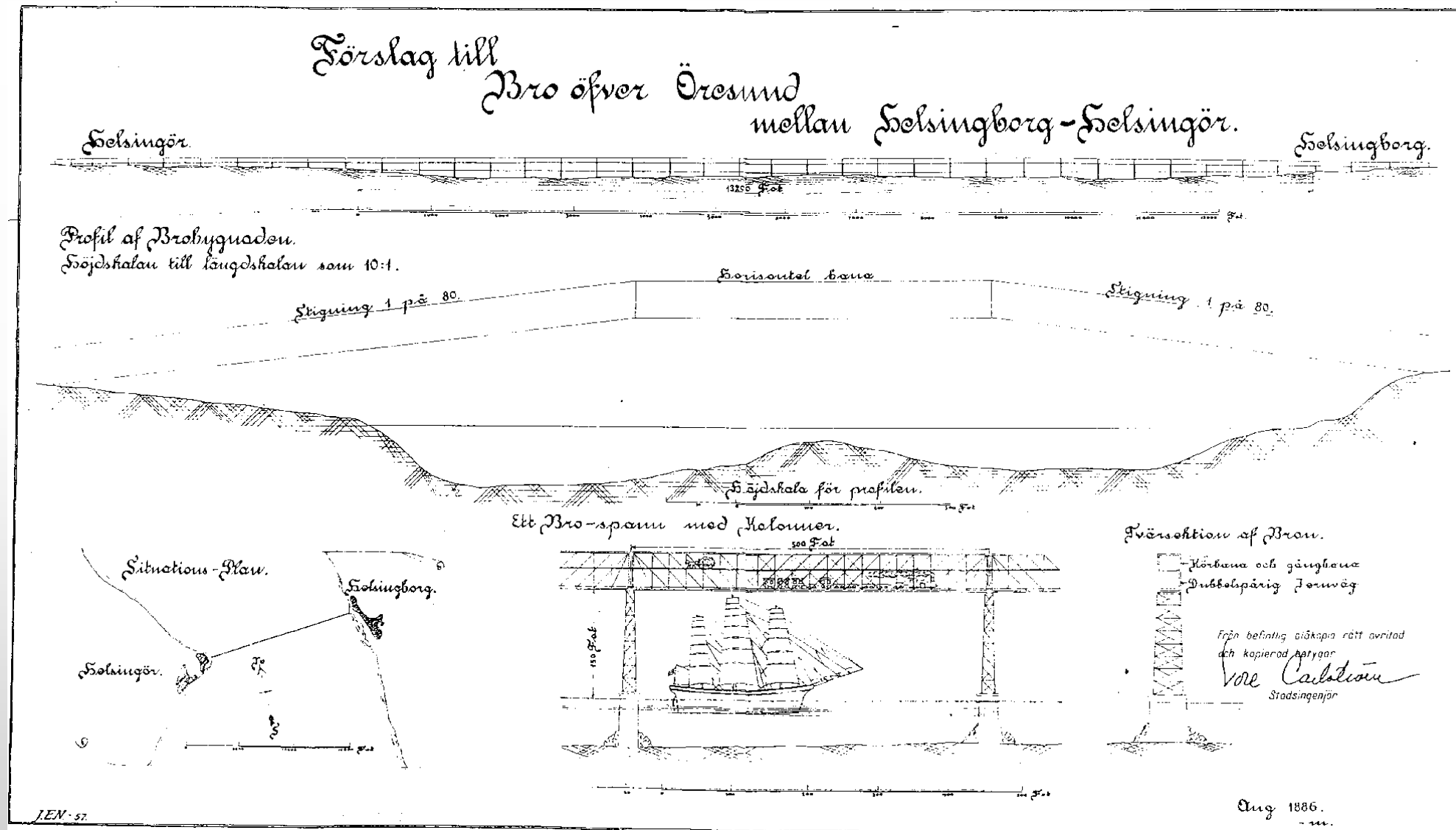


تاریخچه تونل مستغرق

ایده اولیه تونل مستغرق در سال ۱۸۰۳ توسط Motray Henry یک مهندس انگلیسی که قصد داشت انگلستان و فرانسه را از طریق یک تونل زیر آبی متصل کند مطرح گشت. این امر یک سال پس از آن بود که یک معدنچی فرانسوی به نام Albert Mathieu اولین طرح تونل حفاری شده را ارائه کرد اما در آن زمان هر طرحی مثل آن از جانب بریتانیایی‌ها به عنوان طرحی برای حمله احتمالی دیده می‌شد.

اولین نمونه‌های آزمایشی تونل مستغرق در سال ۱۸۱۰ توسط Charles Wyatt & John Hawkins ساخته شد. کمپانی Thames Archway یک مسابقه برای ارائه بهترین طرح تونل برای عبور از یک رودخانه ارائه کرد. طرح مربوط به تونل مستغرق از بین ۵۴ طرح ارائه شده انتخاب شد اما بنظر شرکت احداث آن پرخرج و پرهزینه می‌نمود.

تاریخچه تونل مستغرق



تاریخچه تونل مستغرق

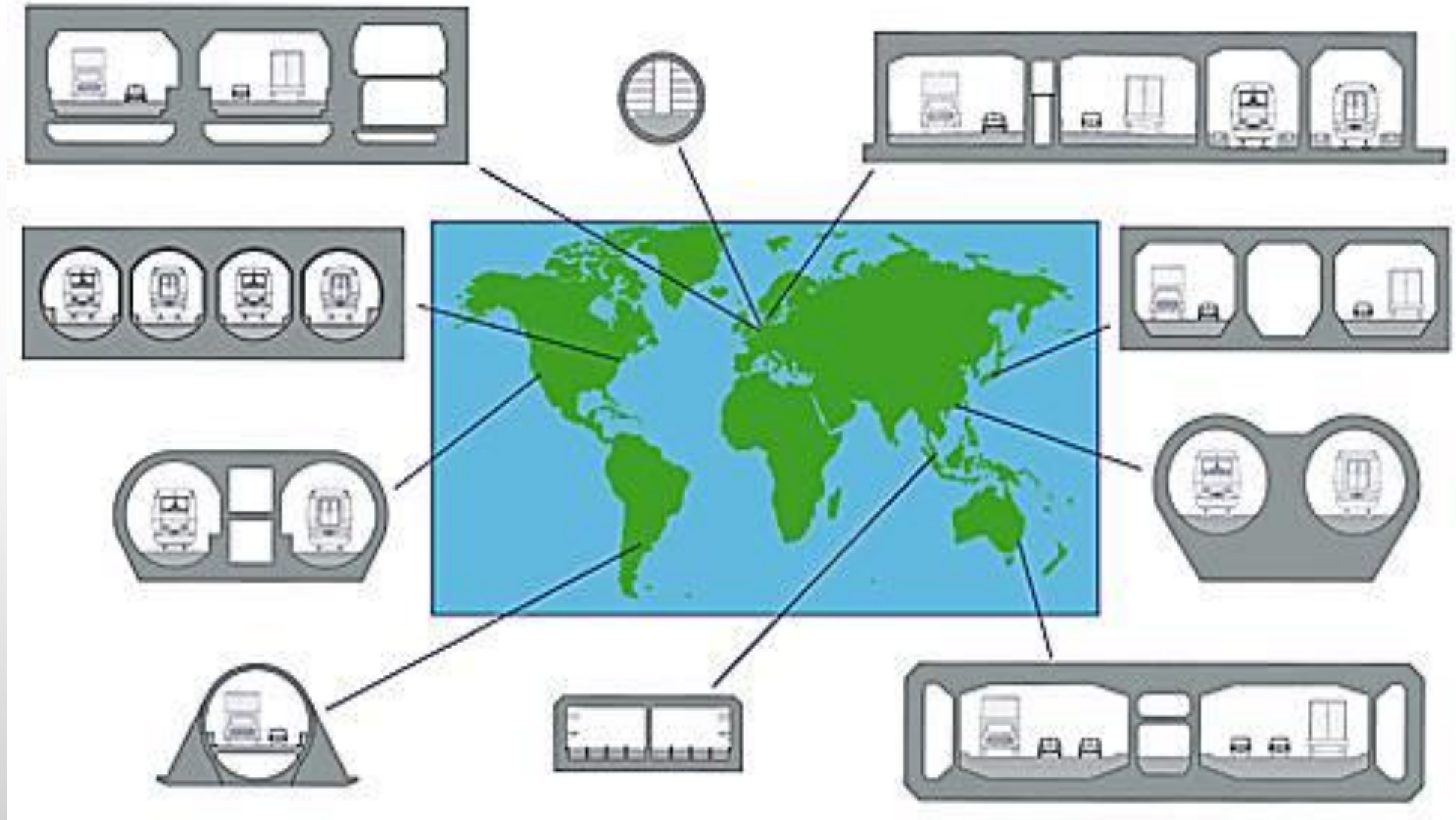
در طول قرن نوزدهم طراحی و مطالعات بر روی این نوع تونل گسترش یافت.

در سال ۱۸۶۶، بیش از نیم قرن بعد از ساخت اولین نمونه‌های آزمایشگاهی Wyatt، احداث اولین تونل مستغرق در شهر لندن شروع شد که به منظور عبور و مرور قطارهای Pneumatic (قطارهایی که با فشار هوا کار می‌کردند) طرح‌ریزی شده بود. ولی به علت کمبود بودجه عملیات ساخت متوقف گردید.

تقریباً ۳۰ سال پس از آن در سال ۱۸۹۳ اولین تونل مستغرق ساخته شد. البته برای انتقال فاضلاب از زیر رودخانه Shirley Gut در بوستون آمریکا با قطری کمتر از ۳ متر و طولی در حدود ۱۰۰ متر راه اندازی شد.

۱۰ سال بعد از آن در سال ۱۹۰۳ ساخت اولین تونل مستغرق برای عبور و مرور قطار در زیر رودخانه ST.Clair برای برقراری ارتباط بین شهر دیترویت و ویندسور کانادا آغاز گشت و در سال ۱۹۱۰ به بهره برداری رسید. از آن زمان تا کنون بیش از ۱۰۰ تونل مستغرق از هلند گرفته تا ژاپن و از نروژ تا آرژانتین ساخته شده است و انواع جدیدی از آن امروزه در حال طراحی می‌باشد.

انواع مقاطع مختلف تونل مستغرق و پراکندگی در دنیا



معرفی و بررسی راه ارتباطی اورسند (Oresund)



راه ارتباطی اورسند (Oresund)

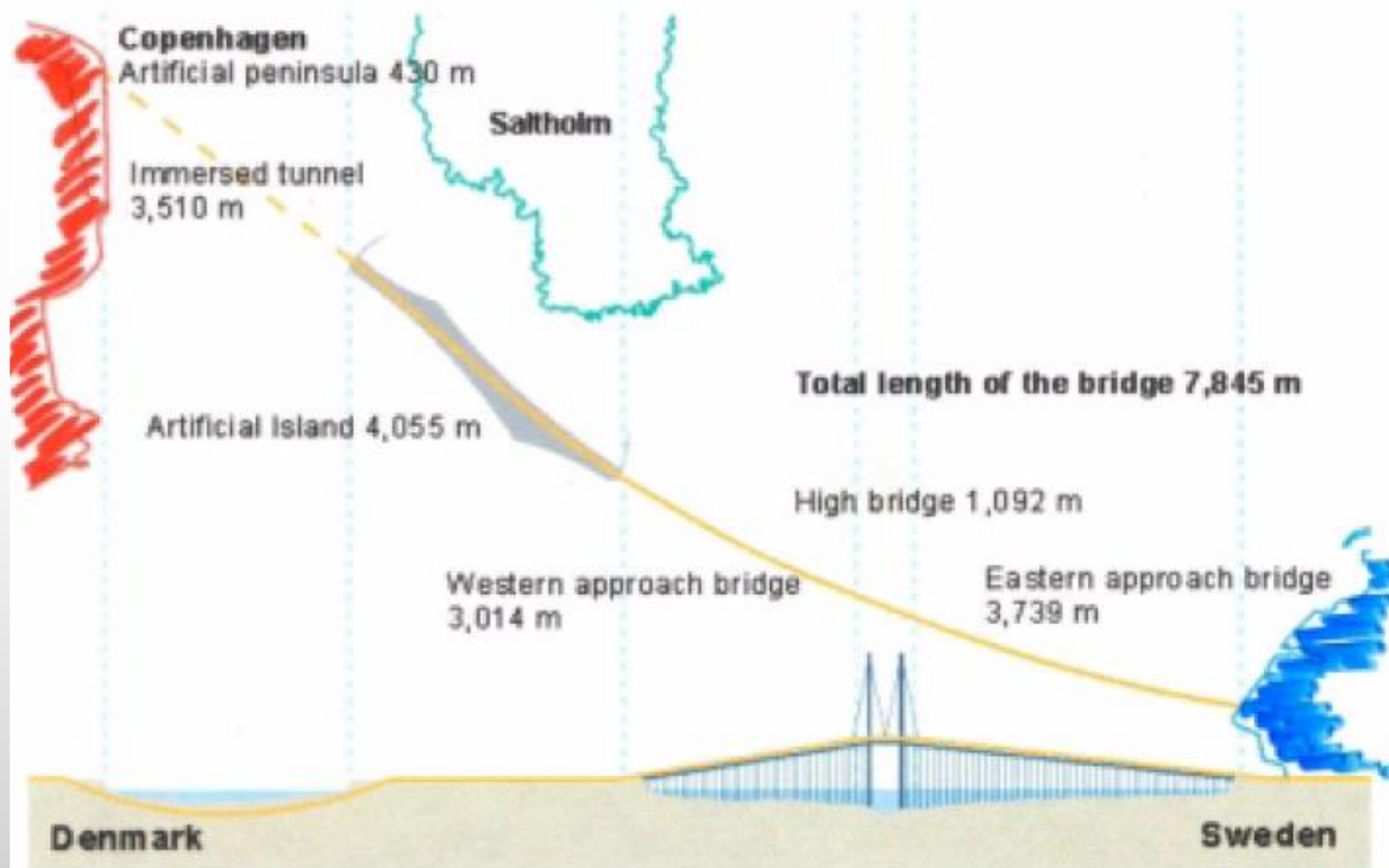
این پروژه از یک پل، یک تونل و یک جزیره مصنوعی بین دو کشور به طول تقریبی ۱۶ کیلومتر تشکیل شده است.

در سال ۱۹۹۱، دولت‌های دانمارک و سوئد قراردادی را برای تأسیس یک راه ارتباطی ثابت بین دو کشور امضا کردند و در ژانویه ۱۹۹۲ Oresunds konsortiet به عنوان شرکت پروژه معرفی شد.

در ژوئن ۱۹۹۴ دولت سوئد ساخت راه ارتباطی در خاک سوئد را تصویب کرد.

از جولای تا نوامبر ۱۹۹۵، Oresunds konsortiet، قراردادهایی را با همه شرکت‌هایی که برای ساخت و ساز مورد نیاز بود، امضا کرد و در مارچ ۱۹۹۹، اولین وسیله نقلیه از تونل عبور کرد و در دسامبر همان سال، اولین خط آهن بین مالمو و کپنهاگ کامل شد و در جولای سال ۲۰۰۰ رسماً به بهره‌برداری رسید.

راه ارتباطی اورسند (Oresund)



پل اورساند

پل دو طبقه با طول ۷۸۴۵ متر که طولانی‌ترین پل مرکب دنیاست با حداکثر دهانه آزاد ۴۹۰ متر که آن هم بالاترین دهانه آزاد در دنیاست و حداقل دهانه آزاد ۵۷ متر و برج‌هایی به ارتفاع ۲۴۰ متر اجزای تشکیل دهنده این بنای عظیم هستند.

پل اورساند از یک پل بلند با دو ورودی تشکیل شده است این پل که هم برای عبور و مرور ماشین و هم برای عبور قطار ساخته شده دارای طولانی‌ترین کابل مهاری در دنیا می‌باشد. پل دارای دو طبقه می‌باشد که طبقه بالا برای عبور و مرور ماشین و طبقه پایین برای عبور قطار ساخته شده است.

مشخصات طراحی پل ارساند

The Øresund Bridge - Linking two Nations

Requirements		Design	
Vehicle speed	120 km/h	Detailed Design	Nov. 1995 - July 1998
Wind speed (10 min)	61 m/s	No of drawings / documents	Approx. 4000
Wave height	2.5 m	Construction time	Apr. 1996 - Apr. 2000
Current	2.5 m/s	Bridge opening	1 July 2000
Ice thickness	0.6 m		
Temperature	+/- 27°C		
Ship impact, pylons	560 MN		
Ship impact, girder	35 MN		
Main span	490 m		

Table 1 - Facts and Figures

جزیره مصنوعی

جزیره مصنوعی به منظور عبور و مرور وسایل نقلیه از تونل به سوی پل ساخته شده است. با طول ۴۲۱۰ متر و عرض ۴۳۰ متر و مساحت تقریبی ۳/۱ کیلومتر مربع از مواد لاروبی بستر دریای اورساند تشکیل شده است.

سنگچینی دور تا دور جزیره ۹ کیلومتر بوده و برای این منظور حدود ۶/۱ میلیون متر مکعب سنگ، ۵/۷ میلیون متر مکعب ماسه استفاده شد.

شامل سازه‌های ویژه‌ای جهت جلوگیری از ورود آب به درون تونل می‌باشند که بخش اعظمی از طراحی‌های مهندسی را به خود اختصاص دادند.

اورساند یکی از زیربنایی‌ترین و مهم‌ترین سازه‌های ساخته شده در اسکاندیناوی می‌باشد. تمام عملیات سنگی این بنای عظیم، قسمتی از عملیات طراحی و ساخت بود که توسط شرکتی به نام Aersleff انجام پذیرفت.

بخاطر مسائل فنی و همچنین زمان بندی بسیار فشرده این پروژه حائل سنگی یکی از بزرگترین چالش‌های این طرح بود.

سنگ چینی دور جزیره به منظور حفظ جزیره و شبه جزیره آن در برابر موج‌های دریا صورت گرفت.

تمام این سنگ چینی ۲ میلیون تن توسط این شرکت و در مدت ۱۴ ماه انجام پذیرفت.

جمع‌آوری و تامین سنگ‌ها با استفاده از یک برنامه‌ریزی فشرده و با محاسبات دقیق و حداقل درصد خطا بدون در نظر گرفتن عمق کم آبراه اورساند به‌عنوان یک امتیاز برای اجرای آن صورت پذیرفت.

جزیره مصنوعی

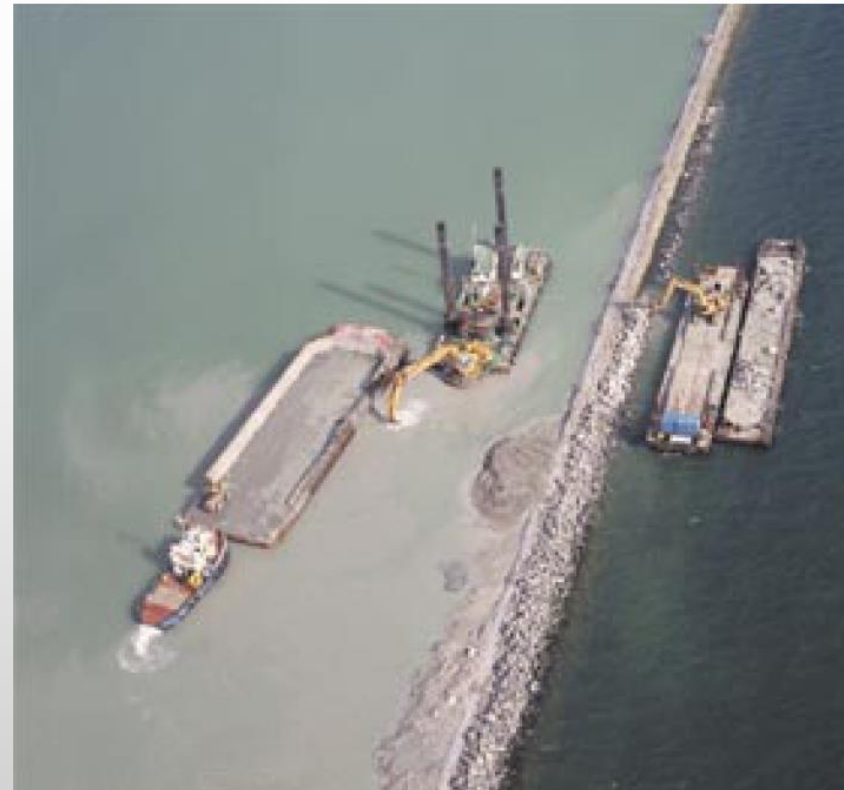
خاکریزی و سنگ چینی بطور معمول توسط ماشین آلات شناور و یا از سطح زمین بوسیله ماشین آلات عظیمی انجام پذیرفت. بخاطر حجم عظیم خاکریزی ابتکارات و روش های مختلفی بکار گرفته شد. در جاهایی بخاطر عمق کم آب در حدود ۲ تا ۶ متر نمی شد از سیستم های معمول ماشین آلات شناور استفاده کرد بنابراین یک ماه پس از انعقاد قرارداد، Aersleff برای خاکریزی در عمق کم از روشی ابداعی به نام *sten jacks* استفاده کرد. در این روش سکوی متحرک در عمق کم احداث می شود که هم برای عملیات حفاری و هم برای خاکریزی مورد استفاده قرار می گیرند.



جزیره مصنوعی

بر روی هر یک از این سکوها یک دستگاه CAT 375 قرار می‌گیرد که با آخرین تجهیزات ماهواره‌ای و سنسورهای فوق‌العاده حساس مجهز شده بودند. به این ترتیب با این روش که ترکیبی از روش‌های مختلف خاکریزی بود، عملیات خاکریزی ۱۳ کیلومتری در عمق کم به ایده‌آل‌ترین شکل ممکن انجام پذیرفت.

قبل از عملیات خاکریزی شمع‌هایی به فاصله هر ۲۰ متر برای مهار قایق‌ها کار گذاشته می‌شود که استقرار آنها را تسهیل می‌کند.



جزیره مصنوعی



جزیره مصنوعی



جزیره مصنوعی

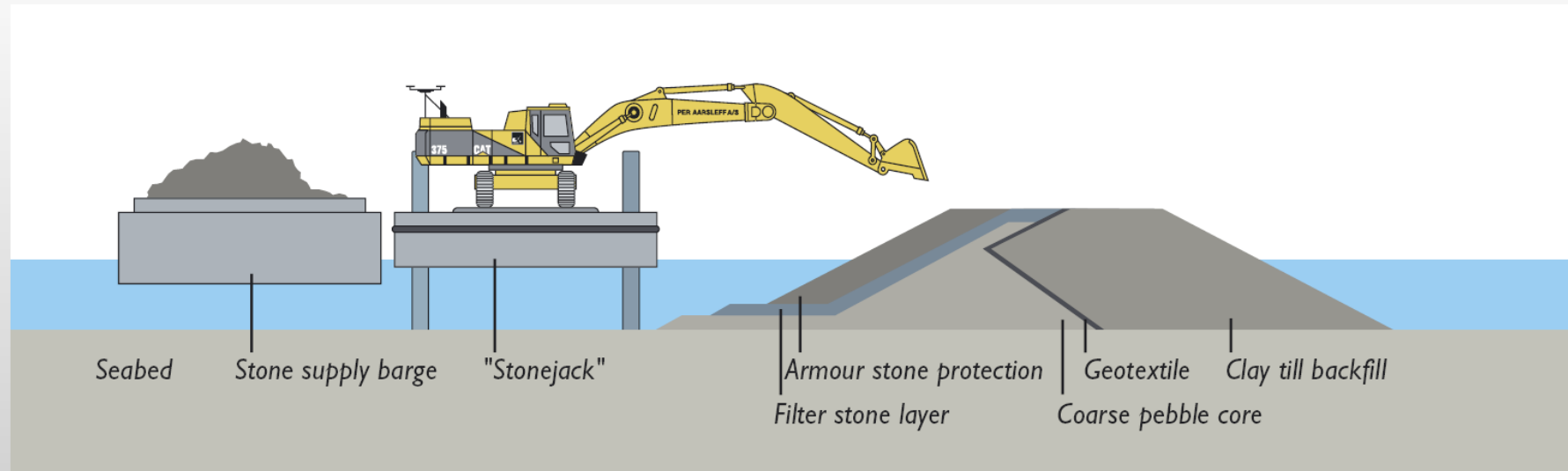


جزیره مصنوعی

وقتی که sten jeck ۵۴ متری در جای خود قرار گرفت، CAT 375 روی آن مستقر می‌شود. ابتدا یک هسته سخت سنگی می‌سازد و سپس لایه‌های دیگر شامل مصالح فیلتر و لایه سنگی محافظ به ترتیب توسط آن از قایق مخصوص حمل مصالح برداشت و بر روی هسته سنگی قرار می‌گیرد.

با استفاده از سیستم‌های ماهواره‌ای نصب شده بر روی ماشین‌آلات و سنسورهای مخصوص این امکان فراهم می‌شود که تنظیم جام ماشین‌آلات در اعماق و سطوح مختلف برای خاکریزی و به این شکل خاص با نهایت دقت و حداقل خطا صورت پذیرد و از این رو sten jack قادر است هر ۲۴ ساعت ۴۰ متر خاکریزی به این نحو را انجام دهد.

از دیگر مزایای استفاده از این روش کاهش حجم ته نشینی مصالح نسبت به سایر روش‌های سنتی ماشین‌های خاکریزی از روی سطح زمین است.

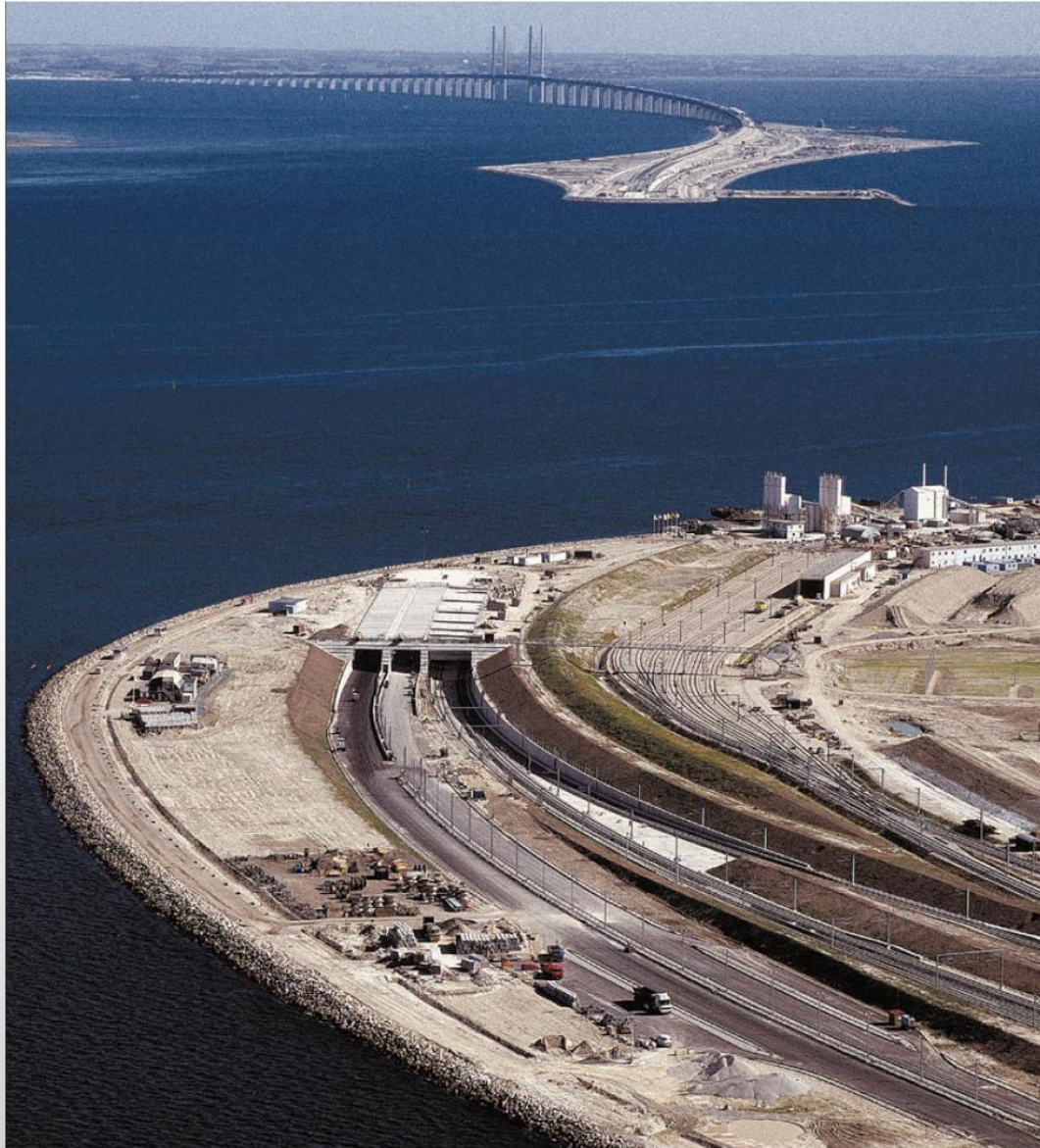


جزیره مصنوعی

از آنجا که از مهمترین مسائل تاثیرگذار بر طراحی و ساخت این بنا ملاحظات زیست محیطی بود بطوری که هسته سنگی با ۱.۵ میلیون تن رس استحصال شده از بستر دریا پوشش داده شد تا از رسوبگذاری آن تا حد امکان جلوگیری بعمل بیاید. بنابراین شرکت مذکور یک لایه غشایی geotextile بر روی هسته قرار داد تا از نفوذ ذرات ریز رس به درون لایه‌های سنگی و در نتیجه رسوبگذاری آنها در درون آبراه جلوگیری بعمل بیاورد. علاوه بر این استفاده از روش stenjeck باعث شد به علت پیشرفت و سرعت بالای کار لایه رسی به بهترین نحو به خاکریز متصل شده و وظیفه لایه محافظ را انجام دهد.

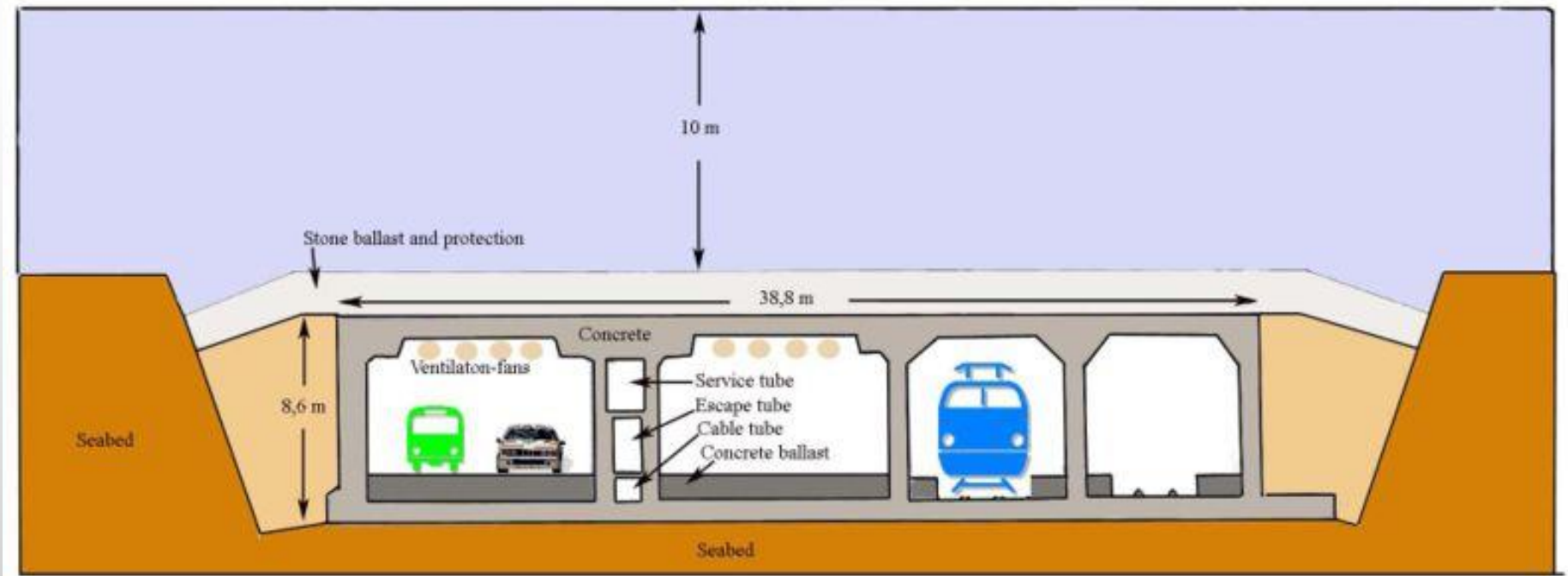
نکته: Geotextile ها بافتهای نفوذپذیری هستند که وقتی بعنوان لایه مسلح کننده بافت خاک بکار برده می‌شوند، توانایی جداسازی، فیلتر کردن، مسلح کردن، حفاظت و زهکشی را به بافت خاک می‌افزایند. علاوه بر این برخلاف روشهای سنتی مسلح کردن و شمع کوبی هزینه کمتری در بر دارند و بیشتر مقاومت خاک را افزایش می‌دهند.

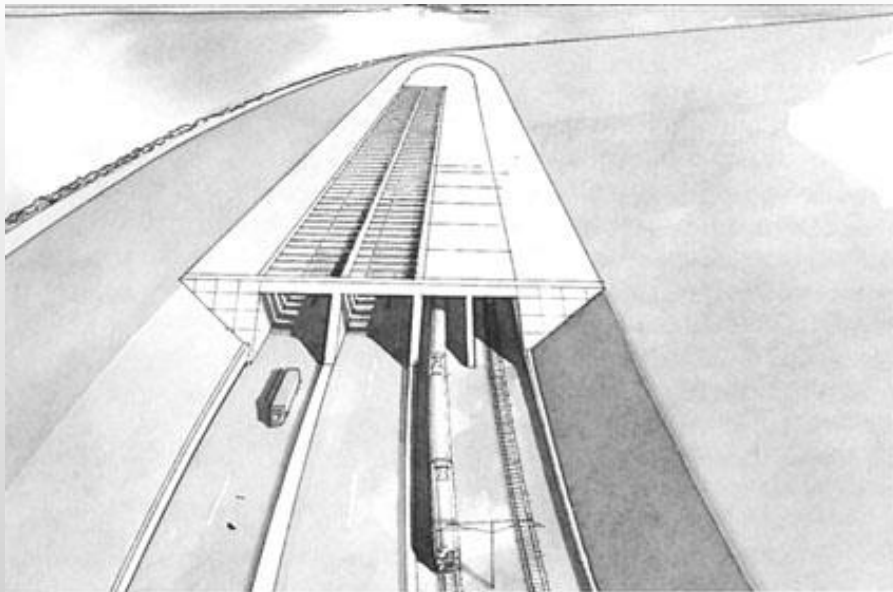
تونل اورساند



- در غربی ترین قسمت راه ارتباطی اورساند بین جزیره مصنوعی Peberholm و شبه جزیره مصنوعی در Kastrup وجود دارد این تونل که هم برای عبور و مرور ماشین و هم برای عبور قطار ساخته شده طولانی ترین تونل در دنیا می باشد .

- تونل از دو قسمت برای عبور قطار و از دو دالان برای عبور ماشین تشکیل شده است. و همچنین از یک مجرا برای سرویس و نگهداری تجهیزات و یک راهروی فرار اضطراری.
- طول قسمت مستغرق تونل ۳۷۵۰ متر است. و کل تونل تقریباً ۴۱۰۰ متر است.
- همه قطعات تونل پیش ساخته بوده و توسط تجهیزات بسیار پیشرفته ای که بعضی از آنها در نوع خود نوع آوری بودند طراحی، تولید و قالب ریزی شدند و با استفاده از تکنیکهای خاصی همانند bridge-jacking به محل حمل و نصب شدند.
- ابعاد مقطع خارجی تونل در حدود ۹ متر در ۴۰ متر است. که در نوع خود رکوردی در دنیا محسوب می شود.
- تونل دارای دو تونل عبور قطار، دو تونل ماشین رو، یک مجرای مرکزی فرار اضطراری و مجرای تاسیسات میباشد.





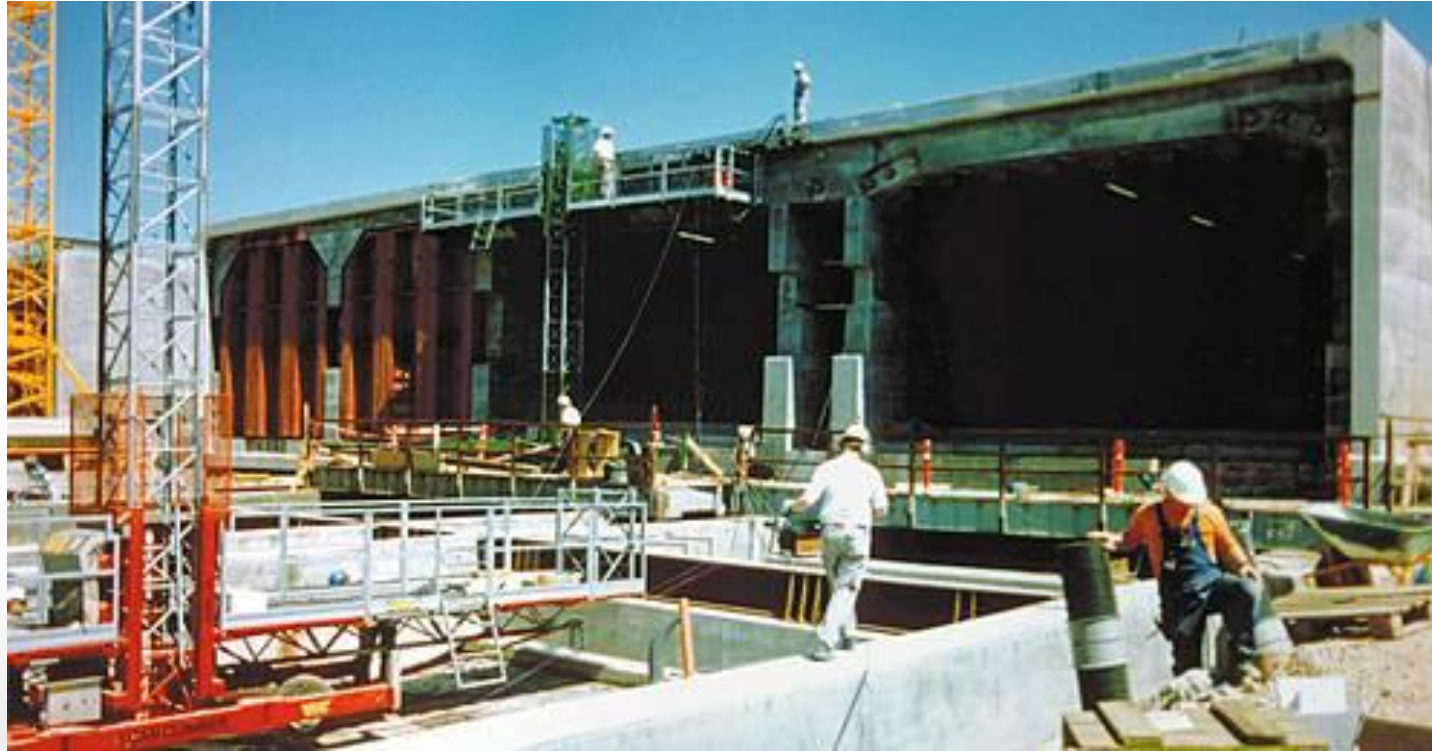
شرکت cowi-vbb-viak بعنوان مشاور طرح تهیه اسناد مناقصه، مطالعات تحقیقاتی، مهندسی پی و سازه، طراحی تاسیسات مکانیکی و برقی و همچنین ارزیابی روشهای ساخت را برای کارفرما Sund link contractors بر عهده داشت. طول مدت انجام این مطالعات طراحی یک سال بود.

بین ۱۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ وسیله نقلیه در روز از این تونل عبور میکنند. سرعت وسایل در قسمت باز ۱۱۰ km/h و در قسمت مستغرق به 90 km/h محدود شود. سرعت قطار به 200km/h میرسد.

طبق قانون دوچرخه و عابر پیاده حق عبور از این تونل را ندارند. حمل وسایل حاوی مواد منفجره تا زیر یک تن مجاز است و این موارد بشدت توسط پلیس در سر تاسر مسیر کنترل میشود.

استفاده از نوآوریهای جدید برای بهینه سازی طول قطعات پیش ساخته و همچنین وسایل ساخت این تونل اجتناب ناپذیر بود. همچنین تمهیدات خاصی برای به حد اقل رساندن ته نشینی مواد زائد بر روی بستر آهکی تونل که می توانست تأثیرات زیست محیطی فراوانی را در بر داشته باشد، اندیشیده شد که قابل تامل است.

نحوه ساخت و طراحی تونل ارساند



- تونل بدون لایه غشایی ضد آب ساخته شده است. این بدان معناست که دیوارهای بتنی باید ضد آب باشند و هیچ گونه ترکی نداشته باشند. بنا براین احداث و بتن ریزی درجا بعلت تغییرات دمایی و همچنین فرسایش خطر ترک خوردگی را به نحو چشمگیری افزایش می داد.
- پیمانکار برنده مناقصه این خطر را با تولید قطعات تونل در محوطه ای که به این منظور در نظر گرفته شده بود و ساخت هر قطعه بطور کامل با ۲۷۰۰ متر مکعب بتن ریزی برای ساخت یکپارچه هر قطعه در هر بار بتن ریزی که تقریباً ۳۰ ساعت بطول می انجامید کاهش داد.

این روش تولید بسیار سریع بود. بعلاوه آنها با توسعه تکنیکها و روشهایی که طی ۲۰ سال اخیر در ساخت پلها بدست آورده بودند ساخت تونل را تسریع کردند. به این ترتیب که در همان هنگام که ساخت قطعات بتنی را انجام می دادند ، جایگذاری قطعات آماده که وزن هر کدام بالغ بر ۷۰۰۰ تن می شود را در دست اقدام داشتند.

برای تحقق برنامه زمانبندی دو قطعه در یک هفته بصورت همزمان ساخته میشدند.

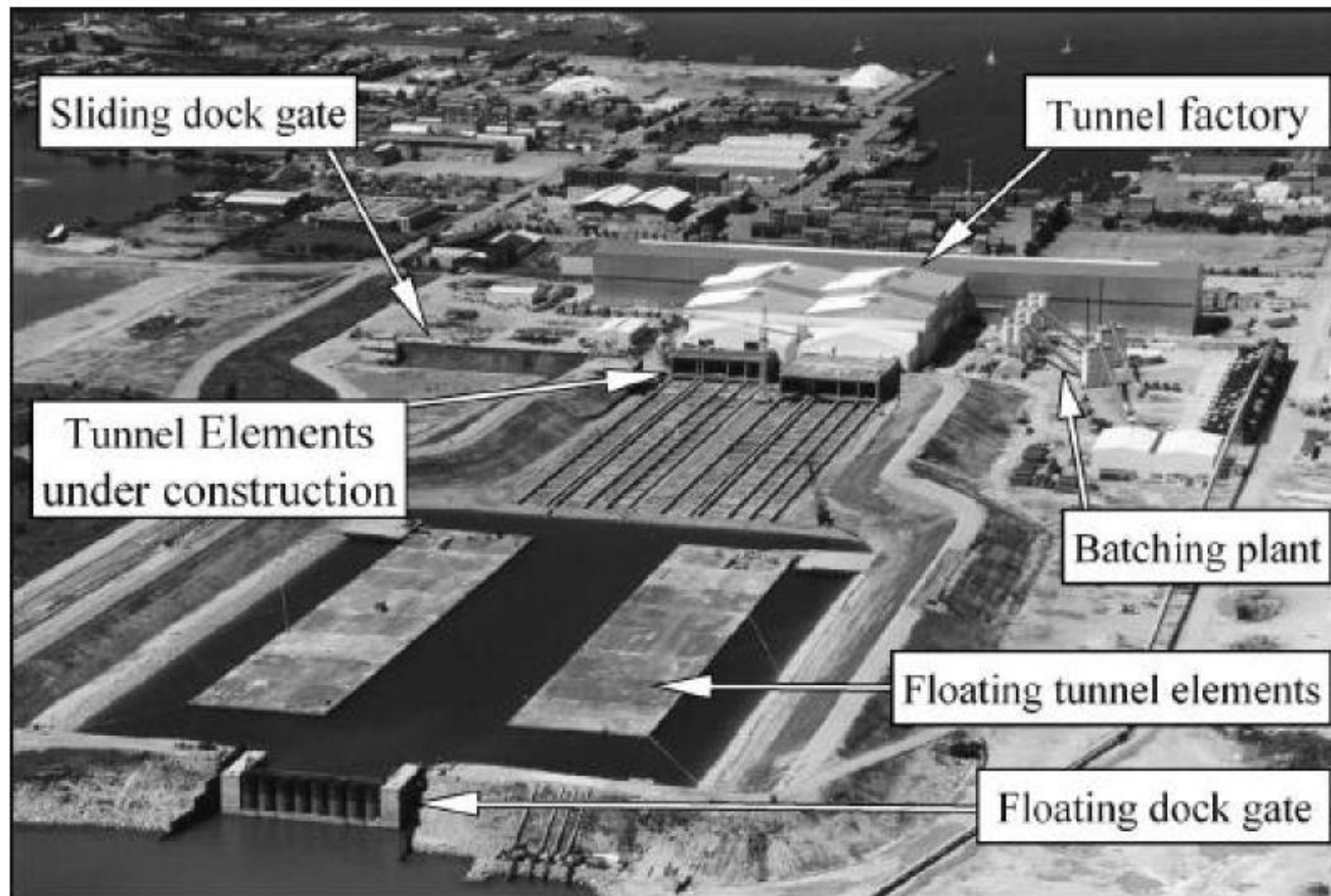


Figure 2 Assembly line facility for precast tunnel segments



- قسمت مستغرق تونل (تونل دارای رمپ نیز میباشد) از ۲۰ المان تشکیل شده است. هر کدام از این المانها تقریباً ۱۷۵ متر طول دارند که در نهایت طول ۳۵۱۰ متری تونل را تشکیل می دهند. هر کدام از این المانها از هشت قطعه تشکیل یافته که توسط کابل‌های پیش تنیده موقتاً بهم متصل شده اند. مقطع خارجی تونل به ابعاد ۸.۶ متر در ۳۸.۸ متر می باشد و وزن المان در حدود ۵۶۰۰۰ تن میباشد.
- وقتی که آخرین قطعه آماده شد و به هفت قطعه قبلی متصل گشت ، دو المان که بصورت همزمان تولید شده اند بر روی یک سیستم هدایت لغزشی قرار میگیرند و به سمت درگاه شناوری هدایت می گردند .

**Figure 1**

Aerial view of Oresund Tunnel Casting Yard

وقتی المانها بصورت کامل در درگاه شناوری قرار گرفتند دروازه های دو طرف درگاه شناوری که یکی به قسمت ساخت و دیگری به دریا باز می شود، بسته می شوند و آب بدرون این قسمت پمپ می شود تا ارتفاع آب به ۹/۹ متر بالای تراز آب دریا برسد. در این حالت دو المان که بر روی سیستم هدایت لغزشی واقع شده اند به نحوی به درون حوضچه منتقل می شوند که بتوانند در تراز خاصی شناور بمانند.



- سپس المانهای شناور به سمت قسمت عمیق تر حوضچه شناوری کشیده می شوند و هر کدام به قایقهای جداگانه ای بسته میشوند .

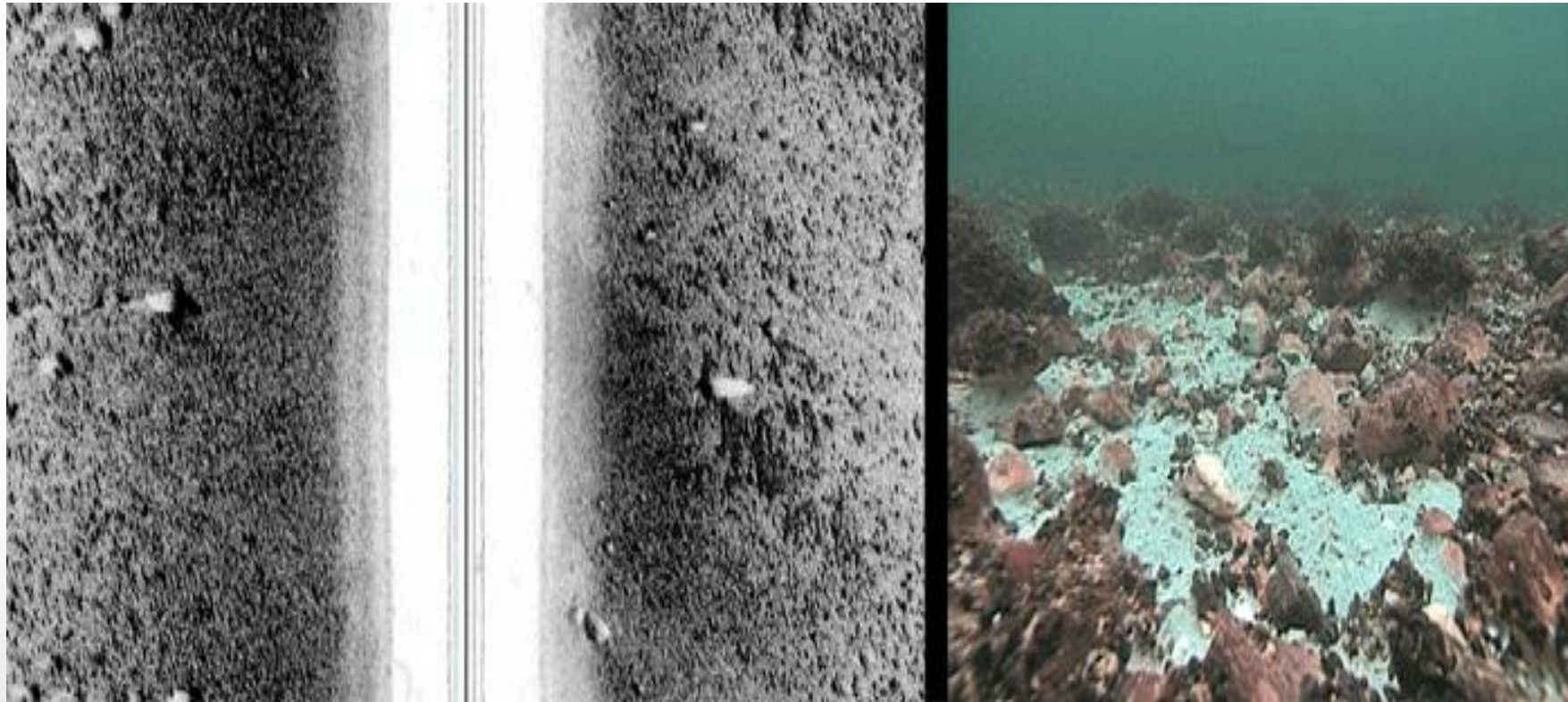


Figure 9
Completed tunnel element exiting the launch basin

- سپس سطح آب حوضچه شناوری بتدریج کم شده و به سطح آزاد آب دریا میرسد. در مرحله بعد دروازه های حوضچه شناوری باز شده و المانها یکی پس از دیگری بوسیله قایق های یدک کش به بیرون کشیده می شوند و بسمت محل احداث تونل هدایت می گردند که البته اگر شرایط جوی مناسب نباشد و یا پیشرفت کار خندق تونل به میزان مورد نظر نرسیده باشد به محوطه ای نزدیک کارگاه حمل میگردند.
- در این پروژه فاصله محل قالب ریزی تا محل احداث تونل ۱۸ کیلومتر بود.

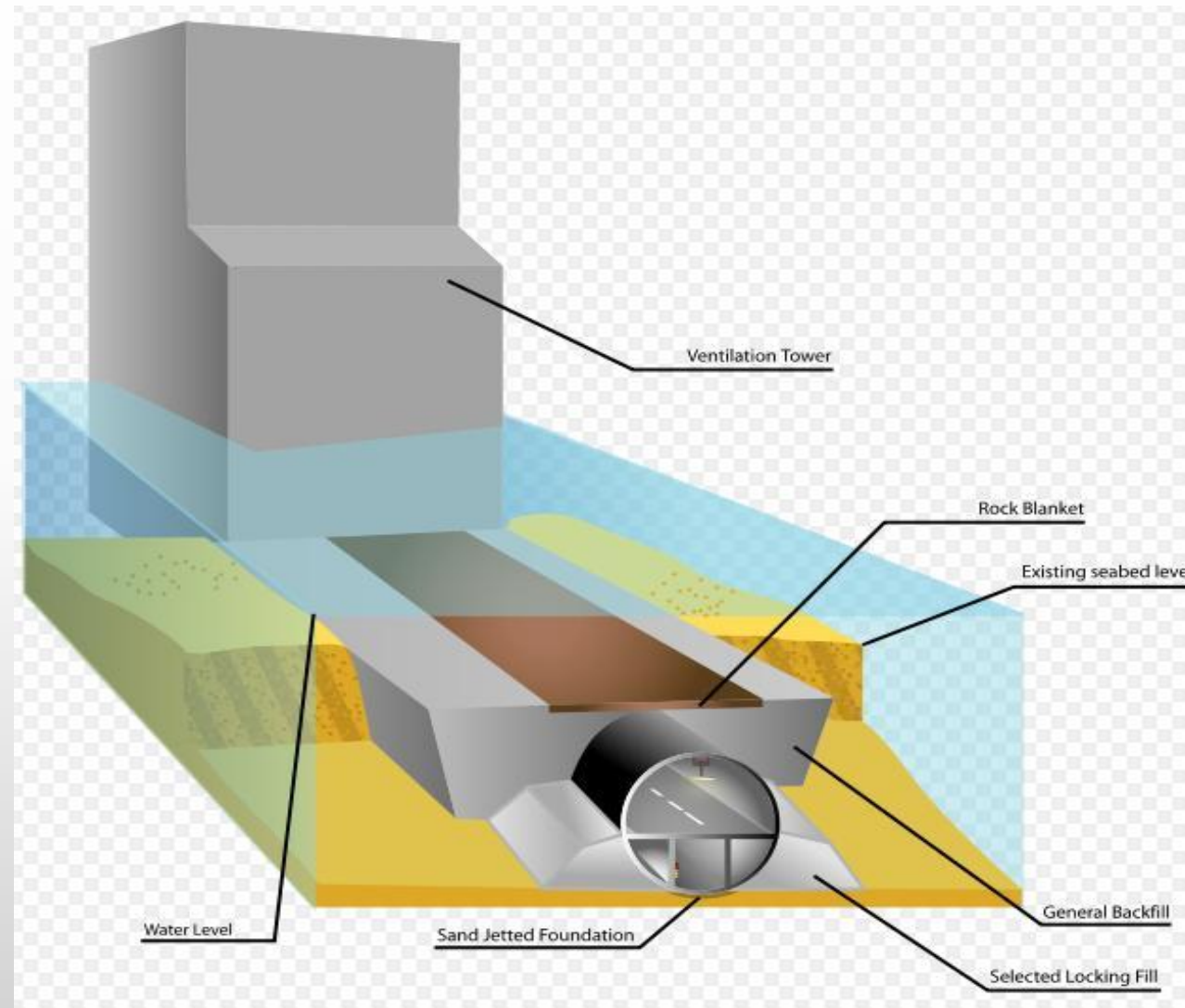


- از آنجا که بلافاصله بعد از شناوری عملیات انتقال انجام میگیرد یک سکوی موقت قایق مانند موسوم به pontoon به المانها ملحق می گردد و انها را بالا نگه می دارد. زمانیکه المانها به نزدیکی محل احداث تونل میرسند به محلهای خاصی که برای لنگر انداختن تعبیه شده اند متصل میگردند و عملیات قرار گیری المانها در جای خود انجام می پذیرد.
- عملیات انتقال توسط دو یدک کش هدایت کننده و دو یدک کش کمکی در هر گوشه المان انجام میگرفت .

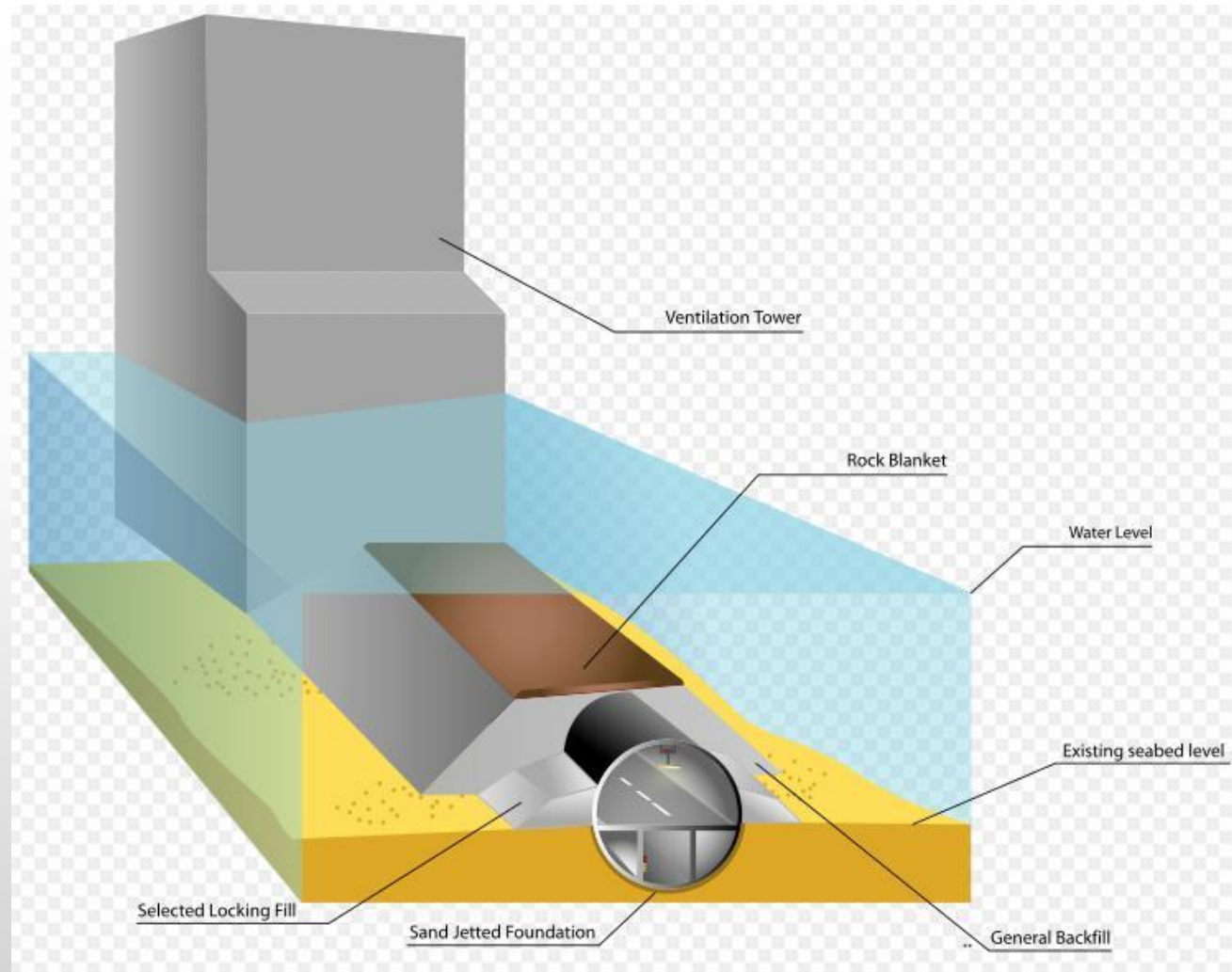


- قبل از عملیات حفر شیار تونل ، عملیات تمیز کردن بستر باید بخوبی اجرا گردد تا هیچ نوع ماده سستی باقی نمانده باشد.

Type A



Type B



ماشین آلات حفاری



ماشین آلات حفاری





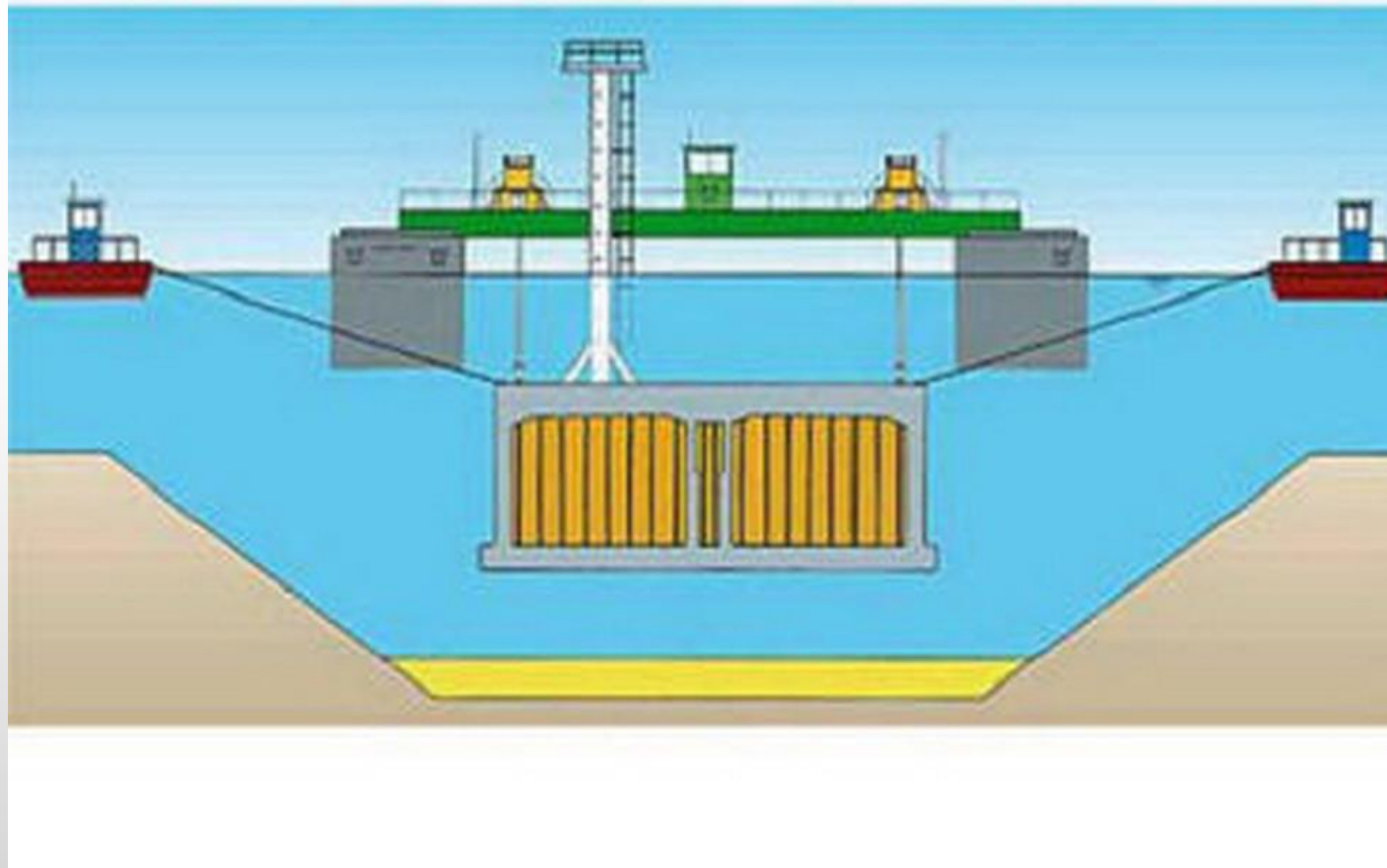
- المانها در داخل شیار از قبل حفاری شده و بر روی یک بستر سنگی که از قبل آماده شده قرار میگیرند و توسط جک های هیدرولیکی تعبیه شده به سمت محل استقرار خود و المان نصب شده قبلی هدایت می گردد که شامل تعدادی میله هادی نیز میباشد.

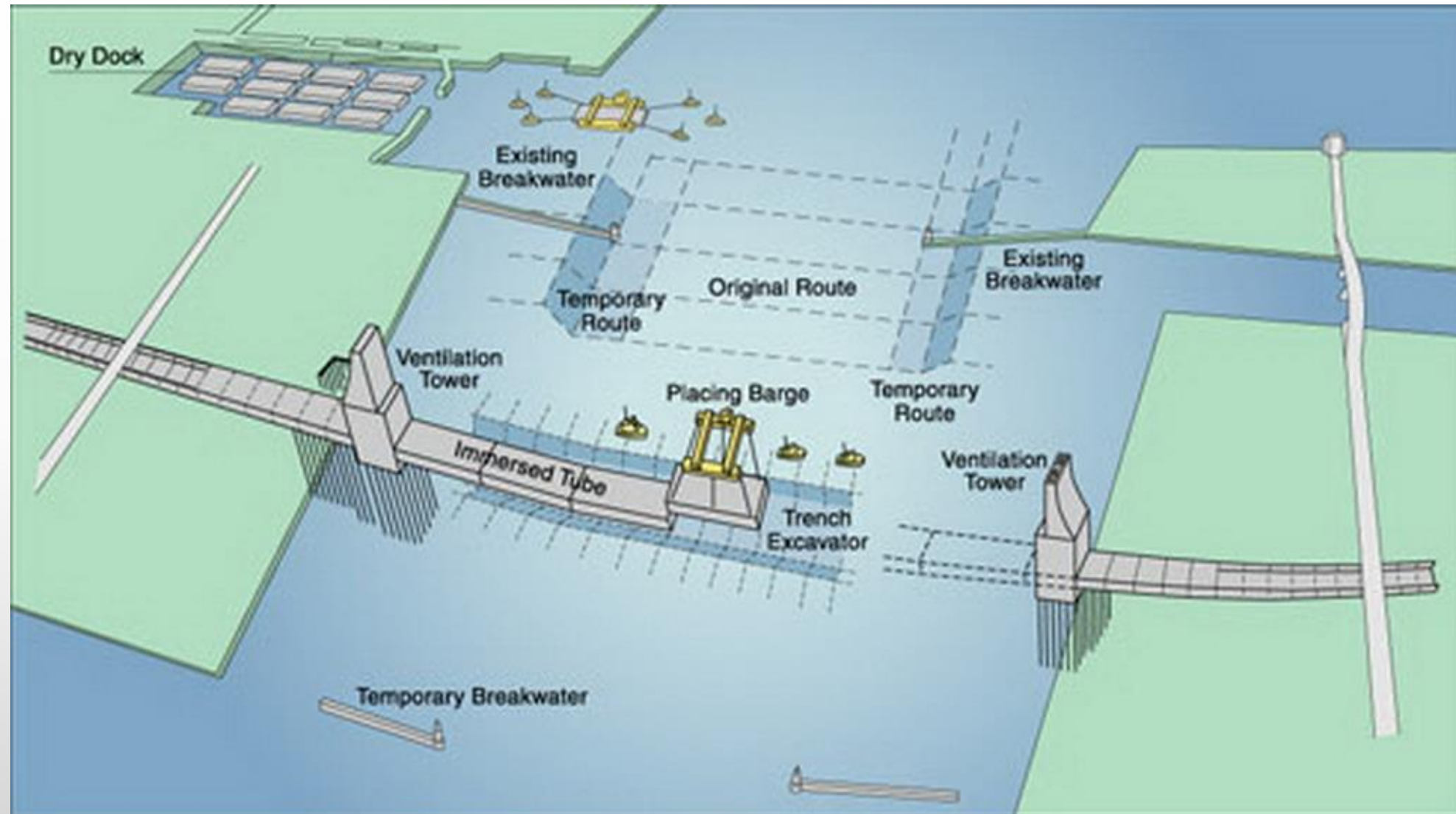
نحوه مستغرق سازی المانها



Figure 9. Immersion of immersed tube element using marine cranes

نحوه مستغرق سازی المانها





اتصالات قطعات



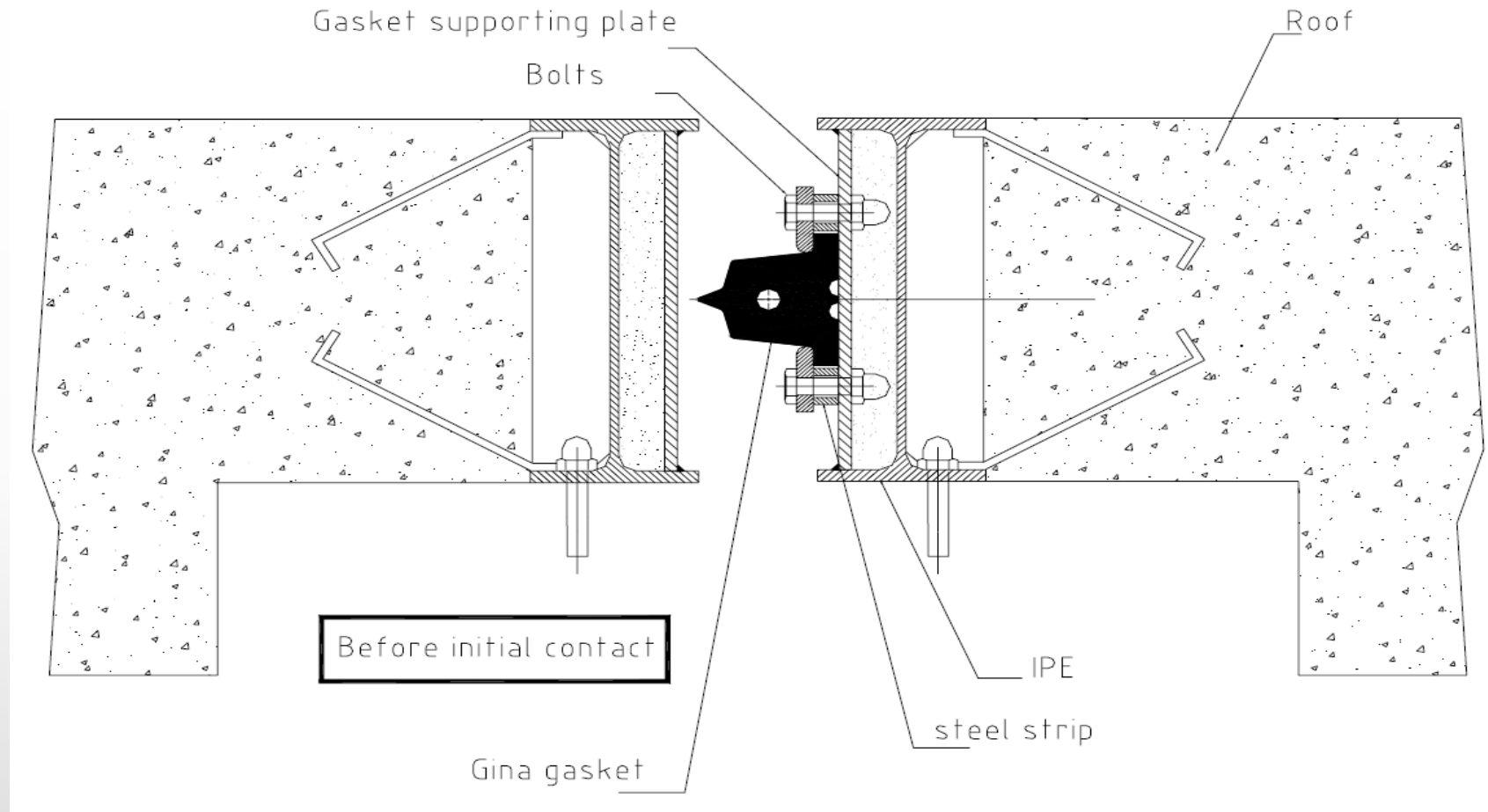
Photo: Top corner of mounted Gina frame – Øresund tunnel

- بند ها و درزهای بین قطعات توسط واتر استاپهای یک تکه که حاوی لوله هایی برای عبور ملات آب بند است **groatable tube**. گرفته میشوند.
- کابل های موقت پیش تنیدگی که هشت قطعه یک المان را در طول عملیات انتقال و فروبردن کنار هم نگه داشته بود بعد از عملیات قرار گیری المانها قطع می شوند.

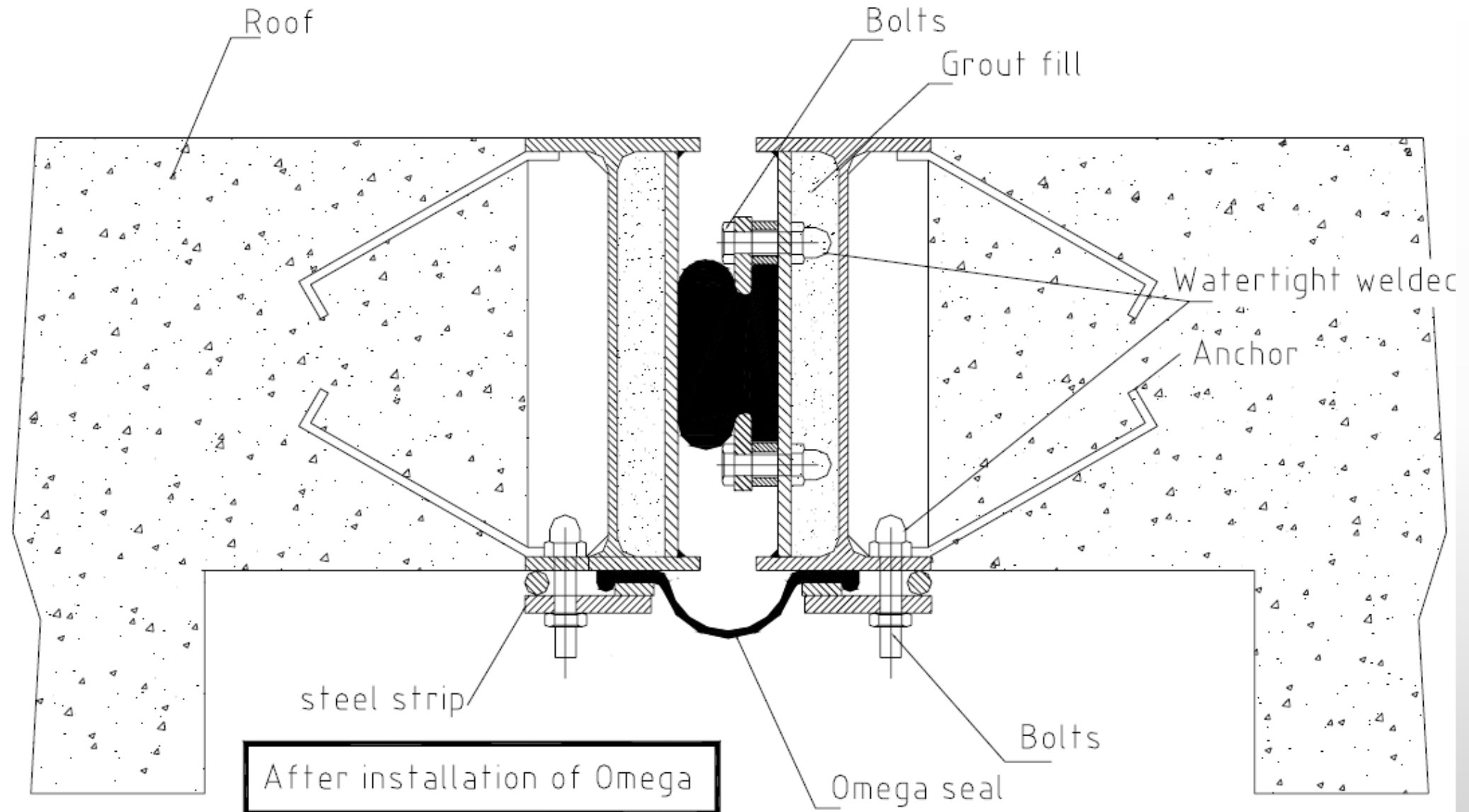


Photo: Hoisting of Gina frame – Øresund tunnel

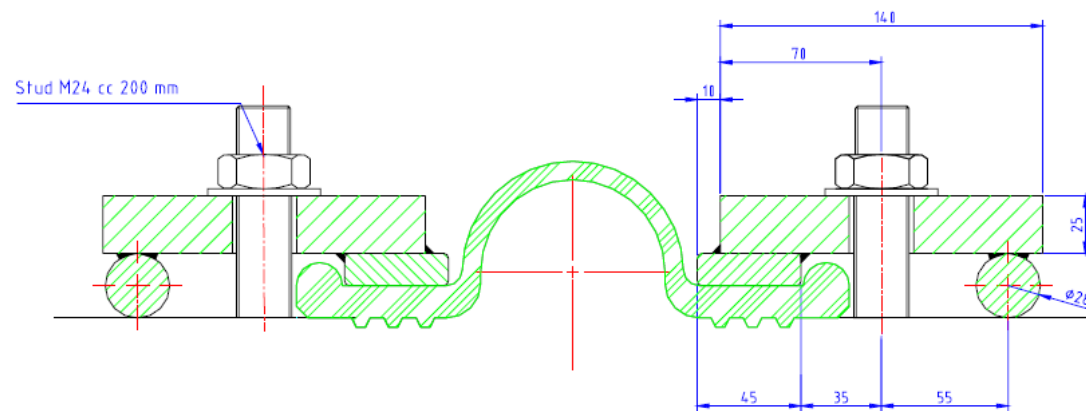
- مفصل بین المانها توسط قابهای فلزی و پروفیل‌های لاستیکی خاصی به اسم GINA به همدیگر محکم میشود پس از آن اتصالات OMEGA نصب شده و در نهایت بتن ریزی میشوند.



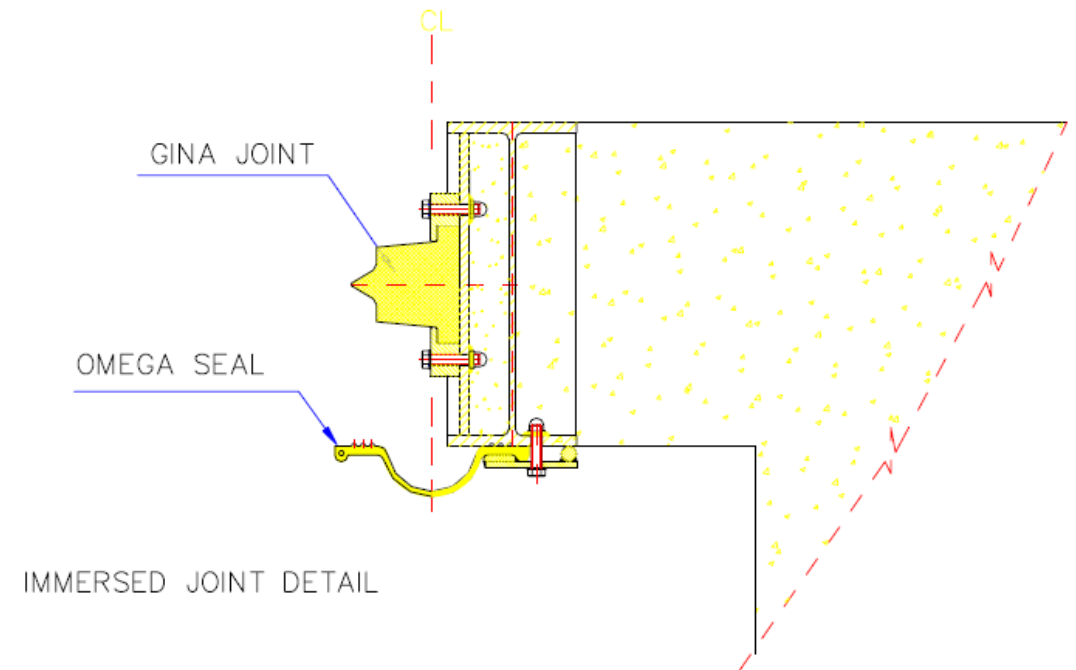
- بطور کلی OMEGA بعنوان درزگیر ثانویه در تونل مستغرق طراحی شد. درزگیر اولیه به نام GINA برای برقراری اولین اتصال بین دو المان تونل بکار برده میشوند. بعد از پمپ کردن آب به خارج از فضای بین جداره های فلزی GINA تحت اثر فشار هیدرواستاتیکی فشرده میشود که باعث ایجاد آب بندی میگردد. بعد از آن جداره های فلزی برداشته میشوند و OMEGA seals پس از آن قابل نصب میباشد. به این ترتیب ارتباط فیزیکی بین المانها برقرار میگردد.



Typical clamping system of OMEGA OS 240-40

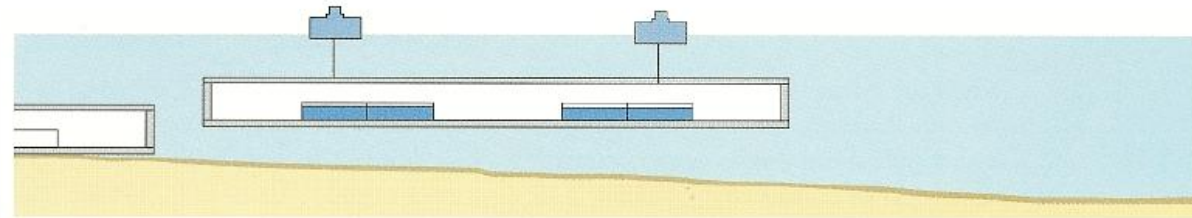


Combination of an Omega and Gina tunnel seal.



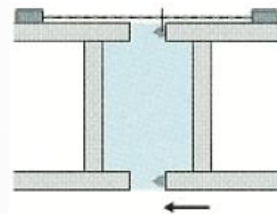


- GINA seals و OMEGA seals نه تنها درزگیری بین قطعات را انجام می دهند بلکه انتقال فشار هیدرواستاتیک و جابجایی بین انتهای المانها را بعلت خاکریزی، خزش بتن، تغییرات درجه حرارت و زلزله های احتمالی را نیز کنترل می کنند. طراحی ها برای یک عمر مفید ۱۰۰ ساله انجام میگیرند ۱۵.
- المان ابتدایی از بندر Kastrup نصب گردیدند و ۵ تای باقیمانده از جزیره مصنوعی Peberholm بنابراین بند اصلی اتصال بین المان ۱۵ و ۱۶ واقع شده است.

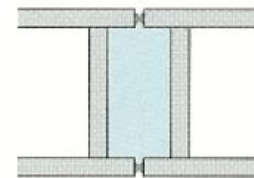


The tunnel element is ballasted and lowered into the trench where a gravel-bed has been prepared

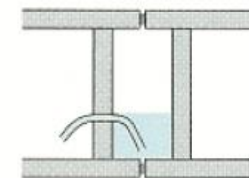
GINA rubber profile



The immersed element is pulled against the previously installed one

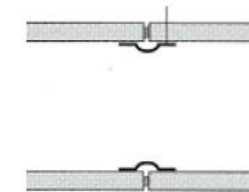


Due to the rubber profile (GINA), a small reservoir is created between the two bulkheads



Water is pumped out of the reservoir. The water pressure on the other end of the element compresses the GINA profile which

OMEGA rubber profile



The bulkheads are removed and a second rubber profile (OMEGA) completes the joint

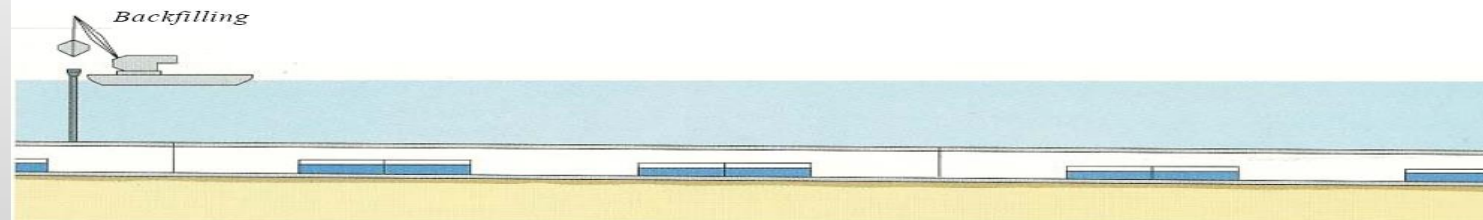
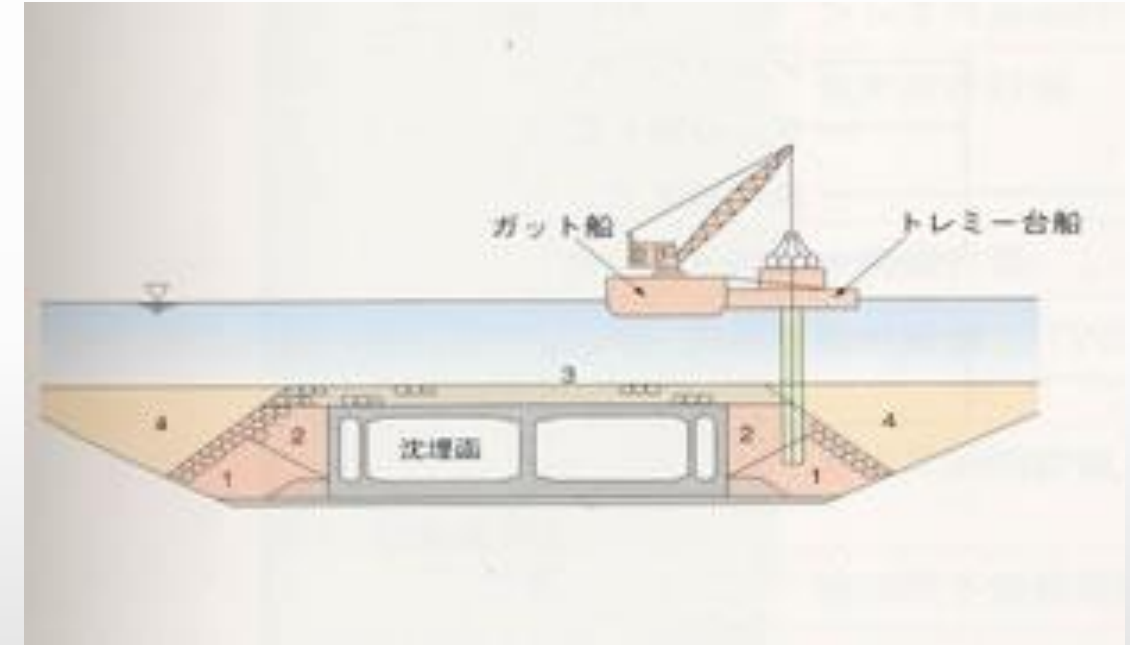
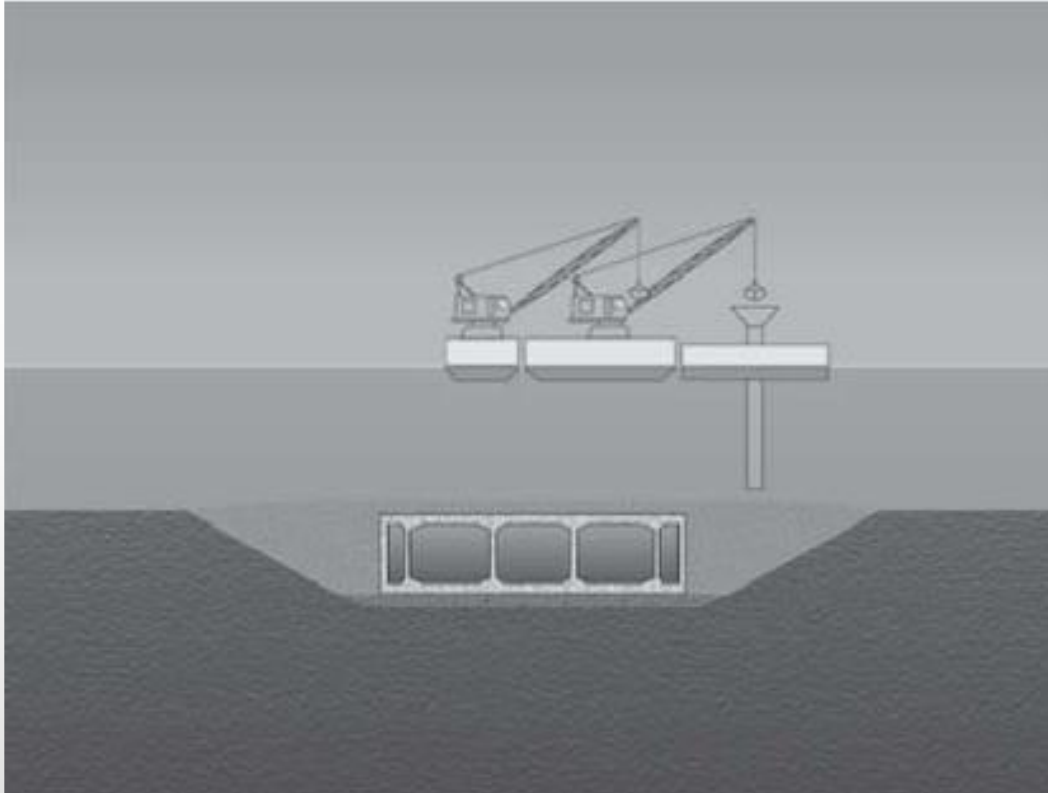


Illustration of Magazine: Design & Construct – Øresund Konsortiet

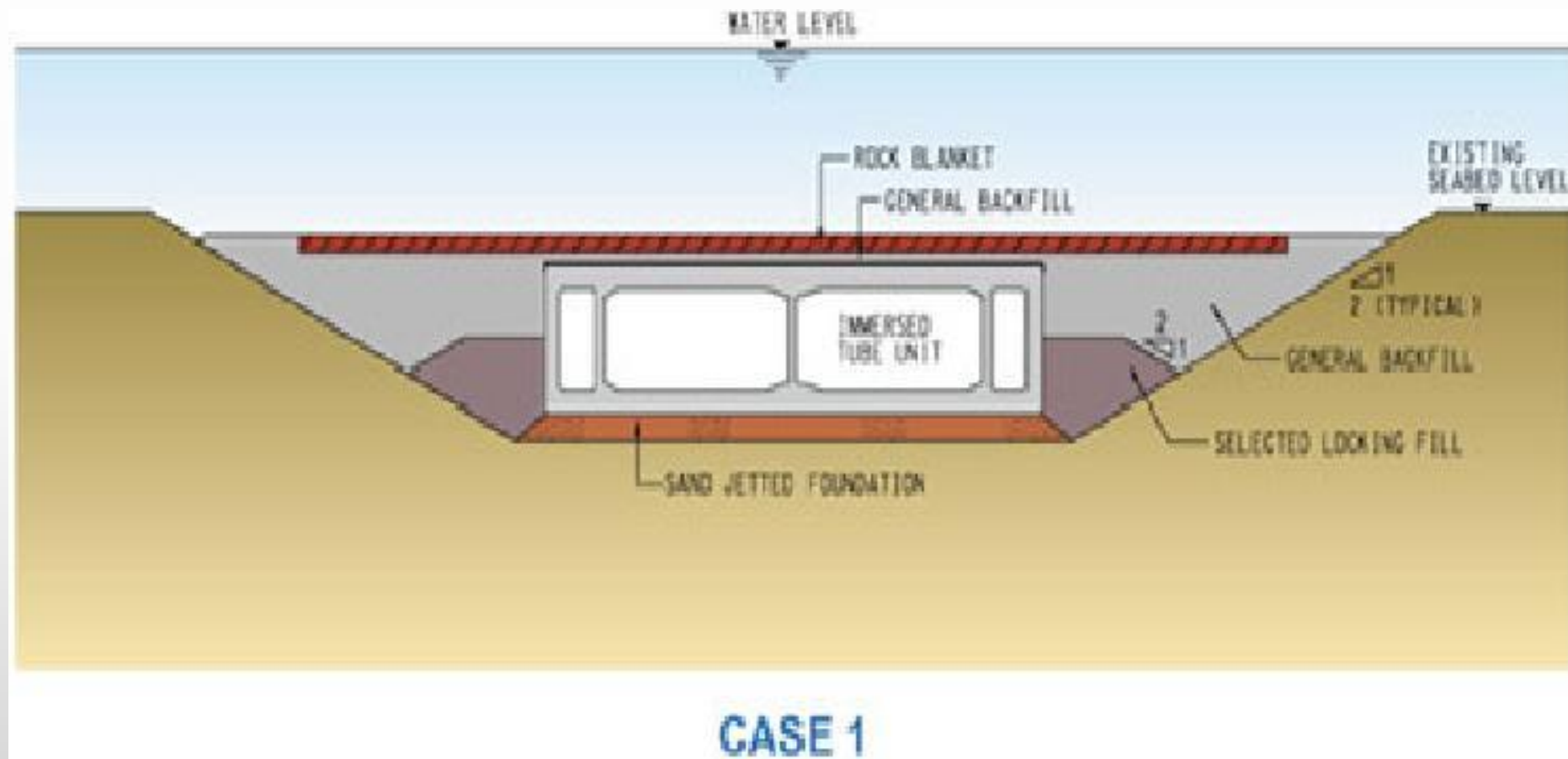


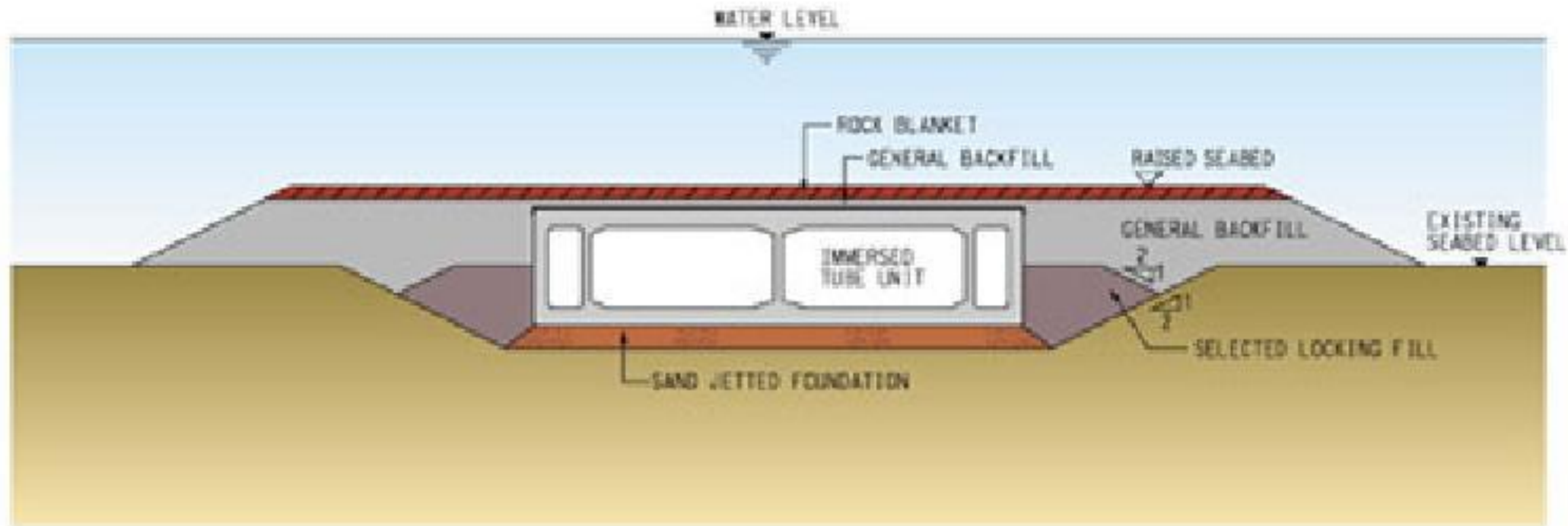
- پس از آن خندق حفاری شده خاکریزی شده و با بافت خاکی مناسب و محافظ پوشیده میشود
- خاکریزی در طول جداره ها و سقف تونل به نحوی طراحی شد که یک پوشش پایدار و محافظ در تمام وضعیتها فراهم کند مانند خطر آیسبرگ ها و موجهای دریایی. تمام پروفیل تونل در پروژه تونل اورساند زیر سطح اب واقع شده است. در کانال Drogan ارتفاع اب بالای تونل ۱۰ متر میباشد

Sand jetting



پوشش صخره ای برای محافظت از تونل در برابر فرو افتادن لنگرها و همچنین کشتیهایی که ممکن است بر اثر غرق شدگی به سقف تونل آسیب برسانند، اجرا شده است. همچنین لایه محافظ در برابر شسته شده، فرسایش و یا خوردگی جریانهای آبی و همچنین پروانه های کشتی نیز مقاوم است.



**CASE 2**

تمهیدات لازم برای نصب تونل مستغرق در خاک لای ماسه دار و ماسه لای دار

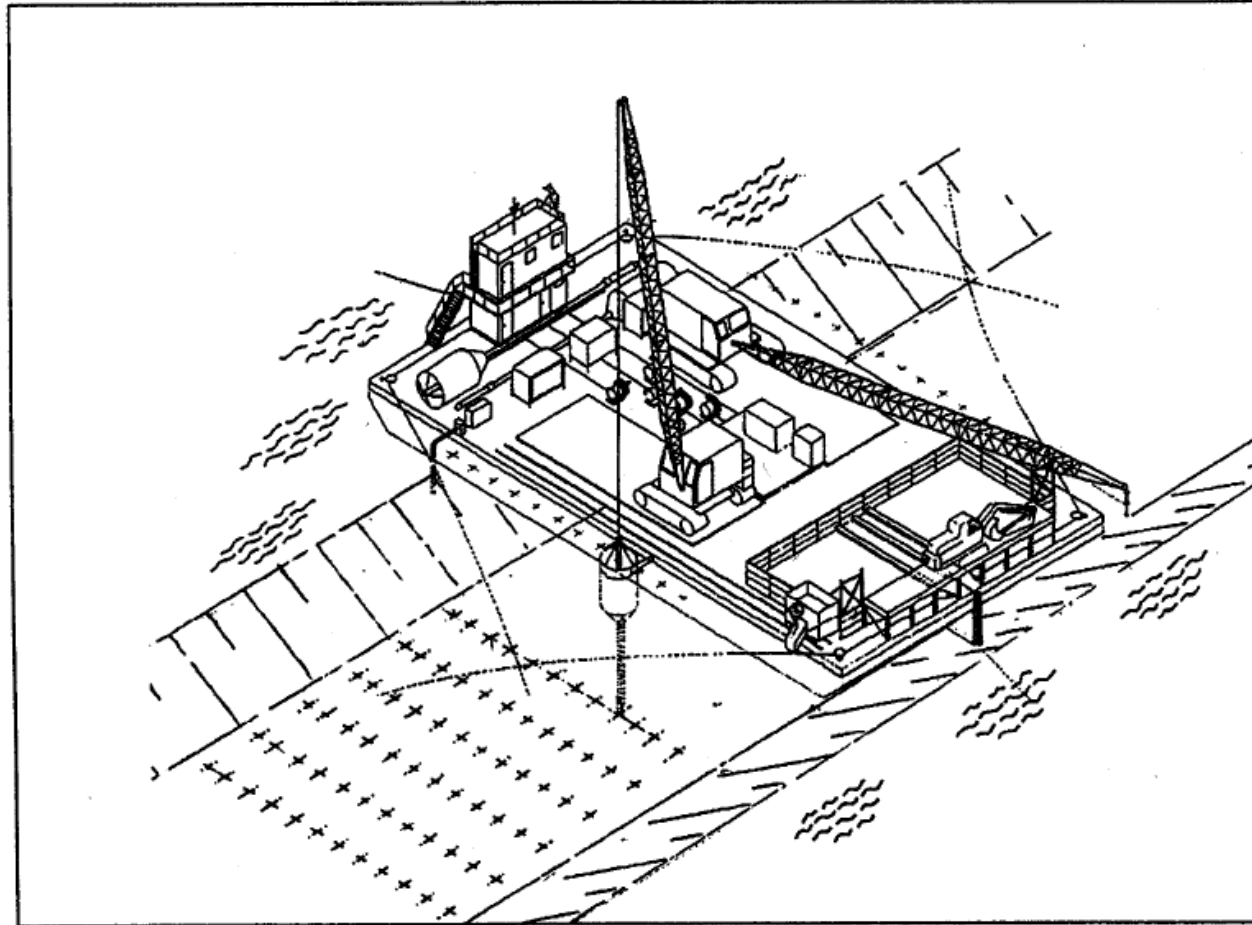
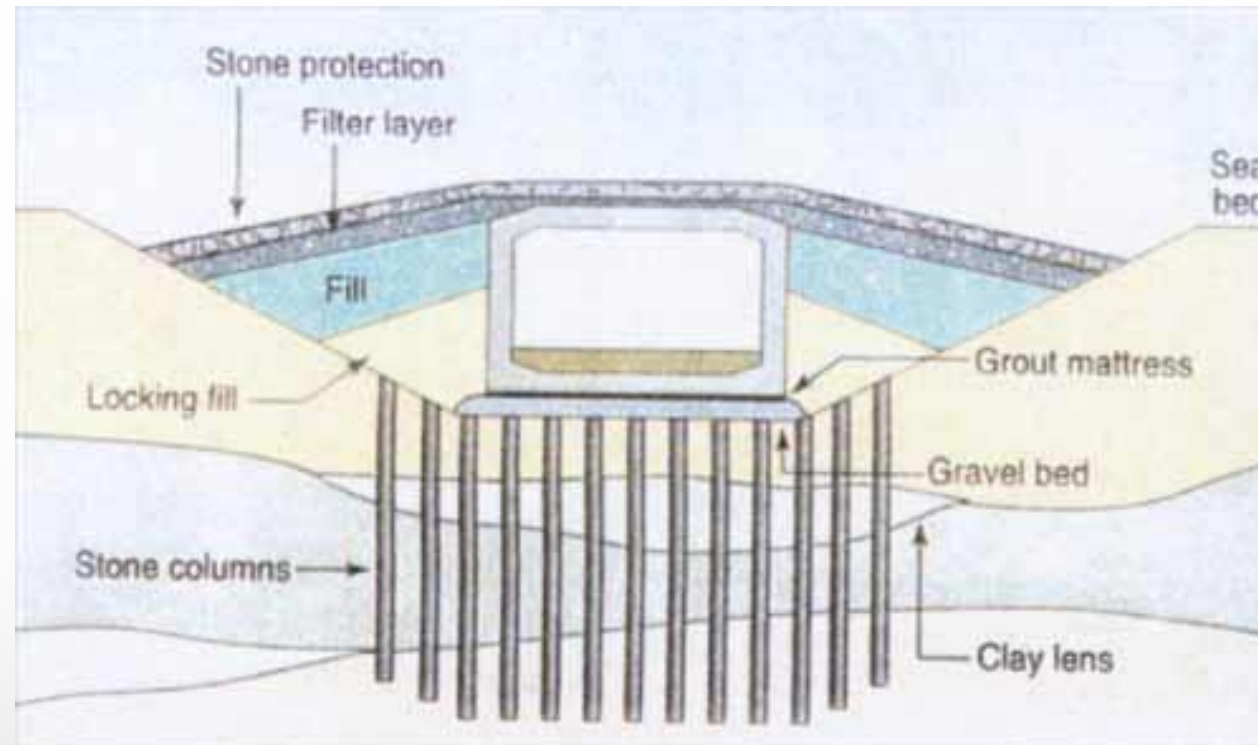


Fig. 5. Installation of Marine Stonepiles

• شمع کوبی در کف دریا به صورت زیر انجام میگیرد.



- به منظور کاهش نشست فونداسیون که تحت اثر فعالیتهای لرزه ای می تواند تحریک گردد ، فونداسیون بر روی تشکی از جنس grout قرار میگیرد. تشک متشکل از بخشهای مجزایی می باشد که تمام سطح زیرین تونل را می پوشاند و قبل از مستغرق ساختن قطعات به آن متصل میشوند . گروت بعد از قرارگیری تونلها بر روی پایه های فونداسیون موقت مستقر د ر خندق به درون بالشتک های تعبیه شده پمپ میشود. حد اکثر جابجایی المان ها در اثر زلزله برای یک جابجایی ۵۰ میلیمتری طراحی شده اند.

تکنولوژی بتن

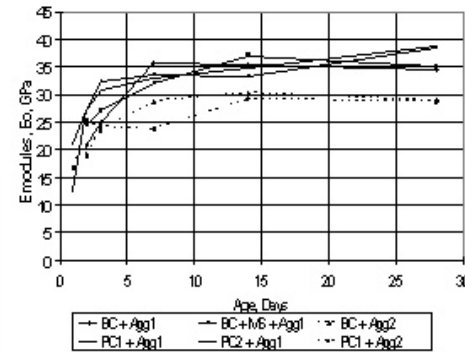


Figure <SEQ> E modulus development of the 6 mixes [4]

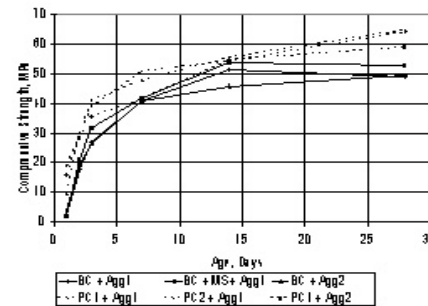


Figure <SEQ> Compressive Strength development of the 6 mixes [4]

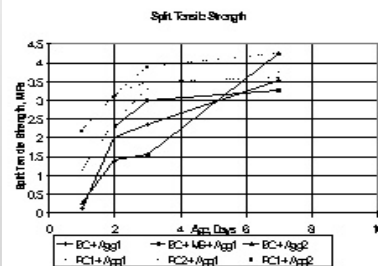


Figure <SEQ> Split Tensile Strength development of the 6 mixes [4]

- برای اطمینان از اینکه بتن دارای بالاترین مشخصات فنی و ضد آبی می باشد یک تیم از شرکت OTC با همکاری بسیار نزدیک با متخصصان بتن در سوئد و دانمارک مامور انجام تحقیقات بر روی طرح اختلاط بتن های بکار رفته در ساخت این تونل که بالغ بر ۷۰۰۰۰۰ متر مکعب بتن میشد شدند.

- قرارداد تونل در سال ۱۹۹۵ بسته شد و شرکت OTC سریعاً تحقیقات خود را شروع کرد. برای تونل طرح اختلاط دو نوع بتن A و B ارائه برای قسمت نهایی اتصال بین قطعه ۱۵ و ۱۶ که طول آن در حدود ۳۸/۱ متر و حجم بتن ریزی آن در حدود ۸۰ متر مکعب بود بعلت اینکه بتن باید بدرون یک محفظه خالی پمپ میشد که بعلت وجود مانع های زیاد مانند آرماتورها ، لوله های خنک کننده و واتر استاپها عمل تراکم با ویبراتورها معمول ممکن نبود لذا تصمیم به استفاده از یک بتن خود تراکم گرفته شد

برای بتن نوع A طرح اختلاط بتن پیشنهادی پس از بارها آزمایش بشرح زیر ارائه گشت:

Cement	324 kg
PC (A/HS/EA/G)	
Flyash	52 kg
Microsilica slurry (50% water)	24 kg
Water	123 kg (Total water 143 kg)
Retarder	0.40
Plasticiser	10.50
Fine aggregate 0/2 mm	633
Coarse aggregate 2/8 mm	404 kg
Coarse aggregate 8/16 mm	476 kg
Coarse aggregate 16/25 mm	374 kg

برای بتن نوع B طرح اختلاط بتن پیشنهادی بشرح زیر ارائه گشت:

	kg/m ³
Cement PC (A/HS/EA/G)	380 kg
Flyash	70 kg
Microsilica slurry (50% water)	45 kg
Water (added water)	143 kg (total water 174 kg)
Stabiliser	0,150 kg (150 grams)
Plasticiser, melamine formaldehyde resin	14 kg
Fine aggregate 0/2 mm	750 kg
Coarse aggregate 2/8 mm	290 kg
Coarse aggregate 8/16 mm	710 kg

Figure <SEQ> Mix design for selfcompacting concrete

نسبت آب به سیمان و میزان پوشش بتن های A و B

Fig. 4:

Requirements for w/c and cover in the immersed Tunnel

Zone	Environment: Examples of construction elements	Type of concrete	Water/ cement ratio	Cover in mm
1.	Severe marine environment: External walls, floors and roof in the immersed Tunnel	A	0.40	75
2.	Non-marine environment: Internal walls in the Immersed Tunnel. Parts of portal buildings	B	0.45	50
3.	Frost environment: Ramps, parts of portal buildings	A with air	0.40	75
4.	Marine environment: Non-structural concrete Ballast concrete	B	0.45	Not relevant

محل های بکارگیری بتن های A و B

Zone	Environment: Examples of construction elements	Type of concrete
1.	Severe marine environment: External walls, floors and roof in the immersed Tunnel	A
2.	Non-marine environment: Internal walls in the Immersed Tunnel. Parts of portal buildings	B
3.	Frost environment: Ramps, parts of portal buildings	A with air
4.	Marine environment: Non-structural concrete Ballast concrete	B

موارد استفاده تونل مستغرق استفاده کرد؟

هر جا که نیاز به گذر از زیر آب باشد استفاده از تونل مستغرق می تواند بعنوان راهکاری مد نظر قرار گیرد. اما انتخاب نهایی به فاکتورهای مختلفی بستگی پیدا می کند از جمله:

همترازی کف و بستر دریا یا رودخانه:

در جاهایی که بستر دریا همتراز است تونل مستغرق کوتاهتر و تخت تر از تونل حفاری شده انجام میگیرد.

مقطع عرضی:

مقاطع عرضی تونل مستغرق بطور فوق العاده ای تطبیق پذیر و متنوع هستند که این امر آنها را برای ساخت بزرگراهها و حالت های ترکیبی ریلی - جاده ای مناسب می کند.

عمق آب:

بطور معمول در اعماق آب بین ۵ تا ۳۰ متر ساخته میشوند. هر چند طرحهایی برای ساخت این تونل تا عمق ۱۰۰ متری نیز در دست بررسی است.



موارد استفاده تونل مستغرق استفاده کرد؟

ساختار ژئو تکنیکی :

انواع و اقسام مختلفی از بافتهای ژئو تکنیکی می توانند بکار گرفته شوند مخصوصا در شرایط زمینهای دارای سنگهای رسوبی نرم که استفاده از تونلهای حفاری شده می تواند با مشکل مواجه شود. همچنین در مناطقی که خطر زلزله بالا می باشد استفاده از این نوع تونل بصورت قابل ملاحظه ای بهتر عمل کرده است.

دسترسی زمینی:

تونل های مستغرق معمولا در جایی غیر از محل نصب ساخته می شوند و به محل نصب حمل میگردند. بنابر این در محل هایی که بعلا تراکم بالای عملیات ساخت و شرایط ساخت در محل را نمی دهد بهره گیری از این نوع تونل می تواند مفید باشد.

احیای بافت زمین:

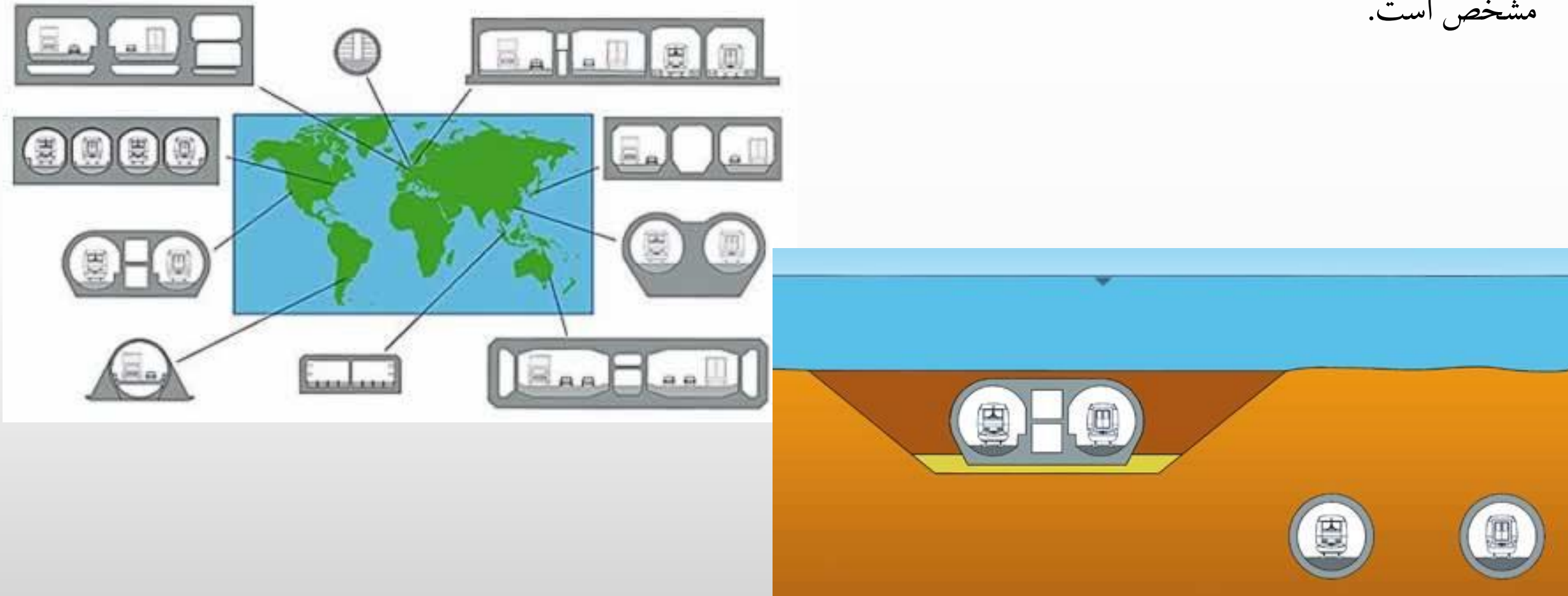
طی عملیات لایروبی فرصتی جهت تجدید وضع بستر رودخانه و خطوط ساحلی بعنوان بخشی از طرح ساخت تونل بوجود می آید که می توان از آن بعنوان نوعی طرح احیا اراضی یاد کرد.

مزایای استفاده از تونل مستغرق



- تونل‌های مستغرق بلافاصله می‌توانند در زیر آب کار گذاشته شوند برخلاف تونل‌های حفاری شده که معمولاً تنها زمانی پایدار می‌مانند که ارتفاع سقف آنها حداقل قطر مورد نظر را زیر آب تامین کند. این باعث می‌شود که طول تونل‌های مستغرق کوتاه‌تر و همچنین قوس تونل کمتر گردد. که البته برای هر نوع حمل و نقلی مخصوصاً حمل و نقل ریلی کاربرد زیاد تری دارد. اما مهمترین خصیصه کوتاهی طول تونل میباشد.

تونل‌های مستغرق لزومی ندارد صرفاً بصورت مقطع دایره ای ساخته شوند و تقریباً با هر نوع مقطعی سازگار هستند که این گزینه استفاده از آنها را گزینه مناسبی برای ساخت بزرگراه‌ها و راه‌های ترکیبی ریلی- جاده ای می سازد که نمونه های آن در شکل مشخص است.



استفاده از تونل‌های مستغرق در شرایط ژئوتکنیکی خاصی که حفر تونل‌های زیر بستری با مانع‌های سخت و یا بسترهای نرم هزینه‌های گزافی مواجهه اند مقرون بصرفه تر است.

تونل‌های حفاری شده یک پروسه پیوسته هستند که هرگونه مشکلی در حین اجرا، کل پروژه را با تاخیر مواجه میکند اما تونل‌های مستغرق سه مرحله ساخت مجزا دارند:

بستر سازی ، ساخت المان‌های تونل و نصب قطعات که بصورت همزمان می توانند اجرا شوند که این امر ریسک برنامه ریزی را بطور قابل ملاحظه ای پایین می آورد. بهمین دلیل اجرای تونل مستغرق عموماً سریعتر از احداث تونل‌های حفاری شده میباشد.



تداخل عملیات با حمل و نقل دریایی

در آبراهه های شلوغ گاهی به نظر میرسد که ساخت یک تونل مستغرق غیر علمی است چون میتواند برای عبور و مرور کشتیها مشکل ایجاد کند اما در حقیقت تجربه خلاف این امر را ثابت کرده است



مسائل خاص اجرای تونل مستغرق

تونل های مستغرق گاهی از دید آنانکه تازه با این نوع تکنولوژی آشنا شده اند بعنوان یک نوع تکنولوژی سخت در نظر گرفته میشود. اما اجرای تکنیکهای ساخت این نوع تونل بمراتب از اجرای تونل های حفاری شده ریسک کمتری را در پی دارد و عملیات ساخت بهتر قابل کنترل میباشد. عملیات زیر آب بر خلاف نظر این عده با مشکل خاصی روبرو نیست. این مسائل بظاهر مشکل شامل موارد زیر است:

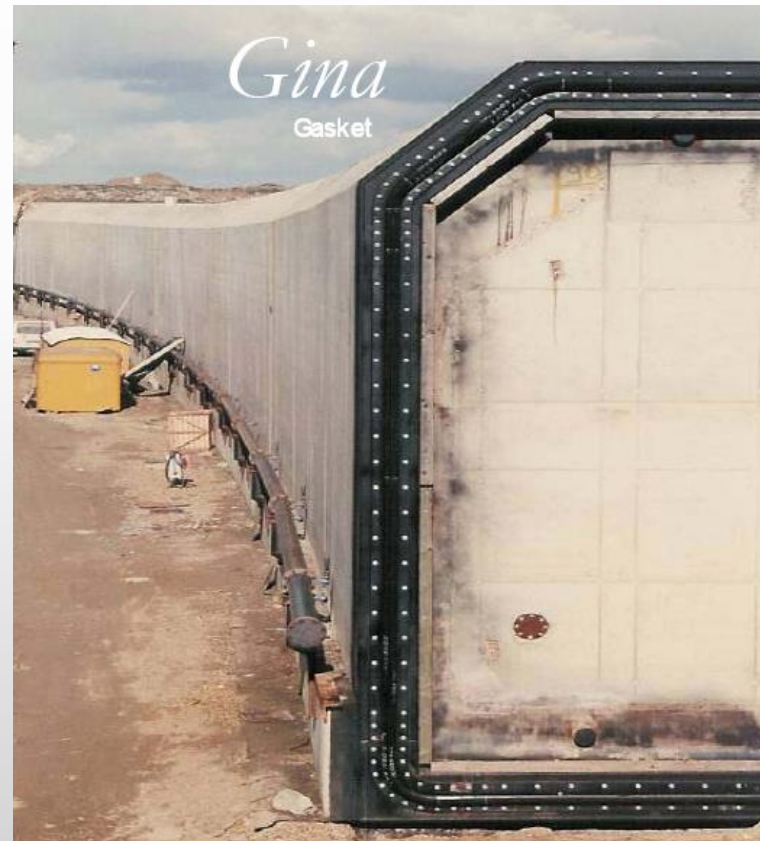
:Dredging

تکنولوژی حفاری بخصوص در سالهای اخیر شاهد پیشرفتهای شگرفی بوده است و برداشت حجم عظیمی از بستر دریا بدون اثرات مخرب بر روی محیط زیست روی آبراه با وسایل جدید براحتی انجام می پذیرد.



مسائل ناشی از نشت آب

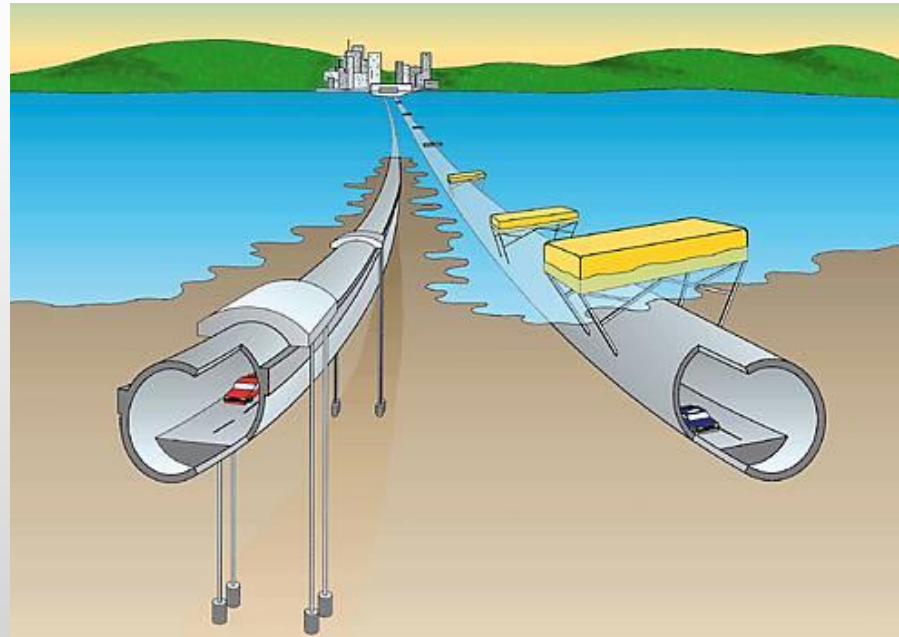
گاهی به نظر میرسد که تونل های مستغرق نسبت به تونل های حفاری شده زیر بستر دریا ممکن است بیشتر دچار نشت آب شوند اما برخلاف این فرض این تونل ها خشکتر هستند. در حقیقت به این علت که قطعات این تونل ها خارج از سطح آب و بر روی زمین ساخته میشوند و اتصالات زیر آبی که با استفاده از واشرهای لاستیکی عظیمی برقرار میگرددند این امر را غیر محتمل می سازد.

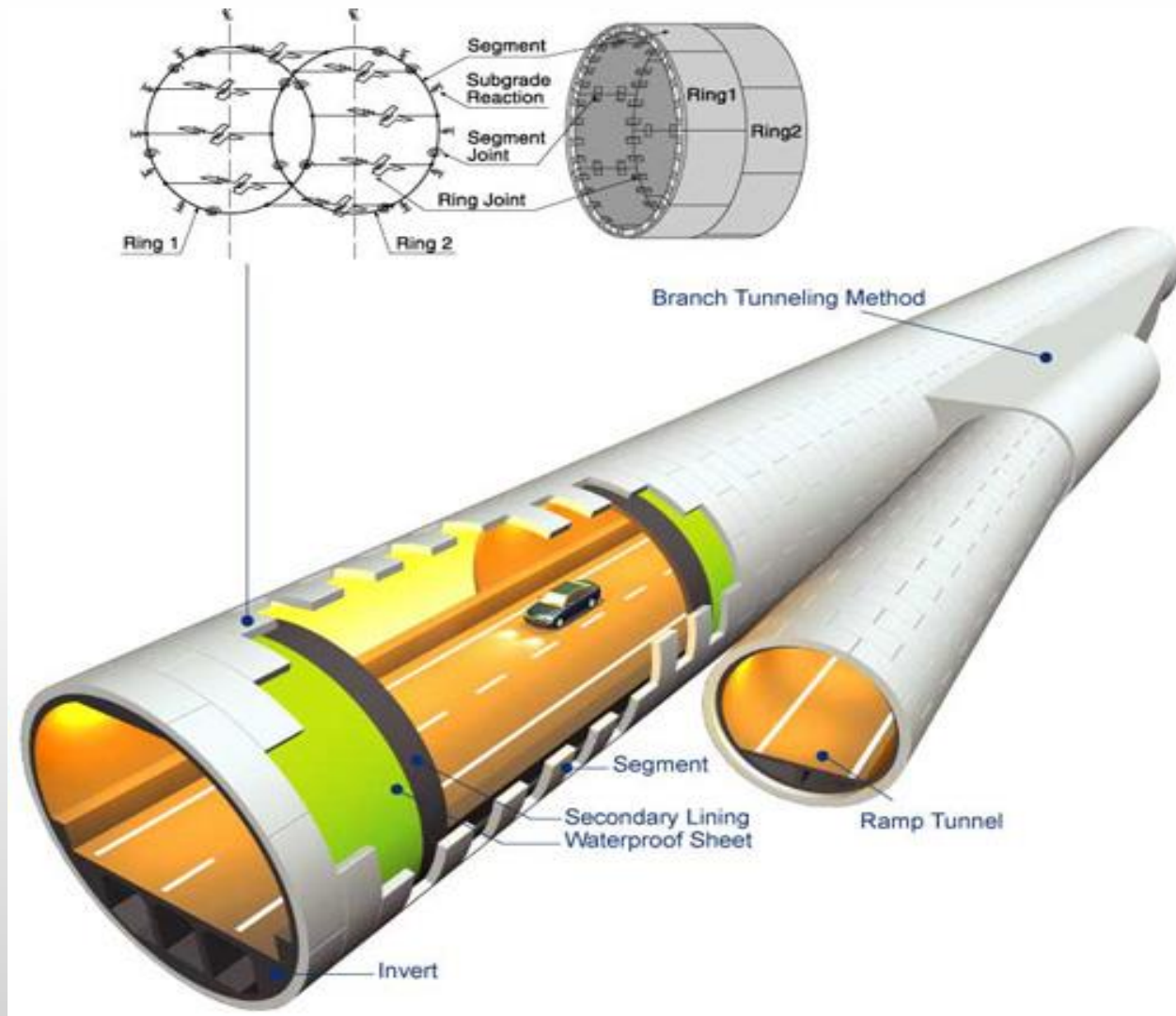


پیشرفت‌های جدید

تونل‌های مستغرق معمول در کف بستر رودخانه‌ها یا در دریا قرار می‌گیرند اما تحقیقات بر روی انواع جدیدی از تونل‌های مستغرق بصورتی که در شکل دیده می‌شود در حال انجام است که کاملاً در آب شناور هستند. این تونل‌ها از قطعات معلق تشکیل یافته‌اند که یا توسط مهارهایی به شکل کماند به بستر دریا متصل هستند و یا توسط قطعات بالشتک‌شکلی که بعضاً در ساخت پل‌های موقت بکار گرفته می‌شوند، نگه داشته می‌شوند.

این تکنیک‌ها فعلاً در مراحل ابتدایی تحقیق هستند و هنوز اجرایی نشده‌اند. تنها یک پروژه در این نوع تونل در فاز طراحی می‌باشد. این نوع طراحی امکان بهره‌گیری از این نوع تونل را در آب‌های عمیق وقتی استفاده از روش‌های جایگزین سخت یا پرهزینه است کاربرد دارد. مانند آب دره‌های عمیق، دریاچه‌های عمیق و تنگه‌های باریک.

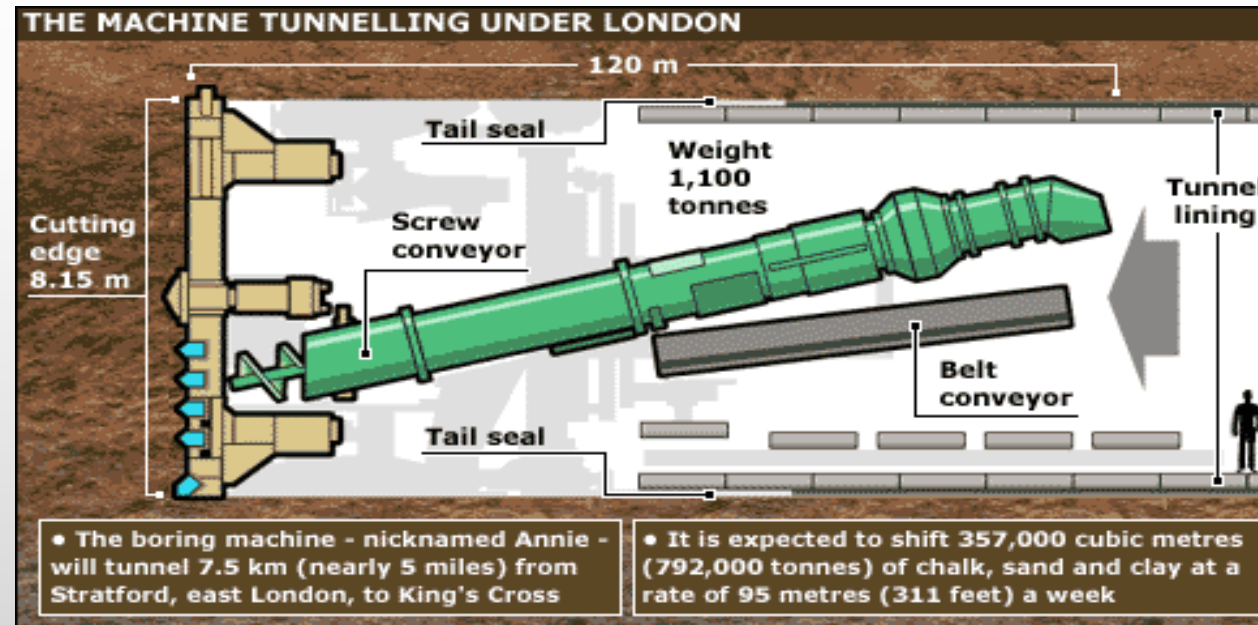




اشکالات استفاده از تونل مستغرق

این روش بطور قابل ملاحظه ای ارزانتر از حفاری تخته سنگها ست و در برابر خطرات زلزله مقاومتر است اما ایرادات این نوع تونل این است که در برابر خرابکاری نسبت به تونل های حفاری شده آسیب پذیرتر هستند و شکست و رخنه پذیری در دیوارهای آنها نسبت به تونل های حفاری شده آسانتر انجام میگیرد.

از دیگر ایرادات آن این است که فعلا تا عمق خاصی قابل اجرا هستند. عمیق ترین تونل مستغرق در تنگه بسفور با عمق ۵۸ متر در حال اجرا می باشد.



سایر ملاحظات ایمنی

برخورد کشتی ها با پل .

به گل نشستن کشتیها در محدوده تونل

آتش سوزی در تونل (تمام دیوارهای داخلی و خارجی با مواد ضد آتش پوشیده می شود.)

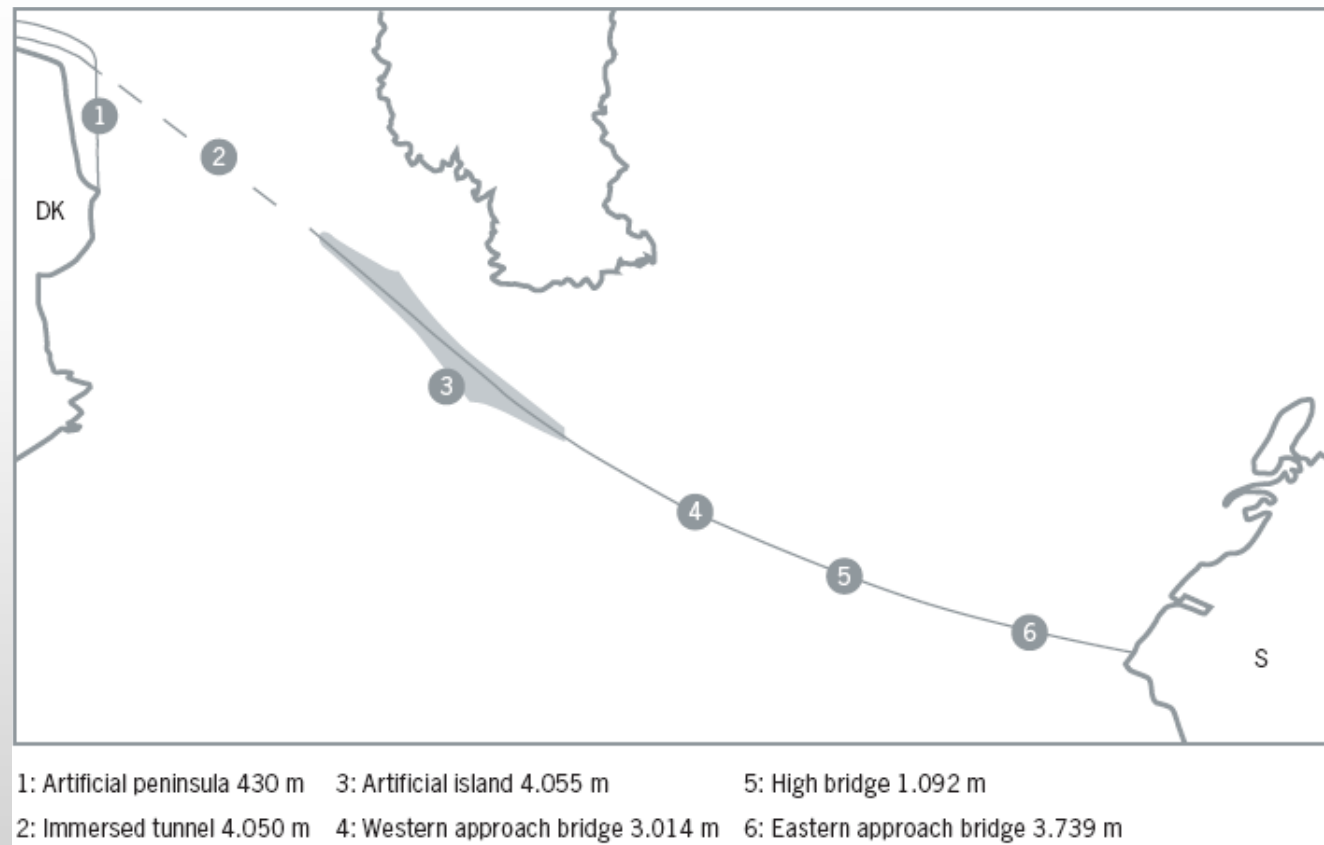
نشت مواد سمی

تصادفات معمولی ریلی و جاده ای



هزینه های احداث

ساخت تونل: ۹۸/۳ میلیارد دلار. (۷/۹۸۲ میلیون دلار به ازای هر کیلومتر)
 ساخت جزیره مصنوعی: ۶/۱ میلیارد دلار. (۵/۳۹۴ میلیون دلار به ازای هر کیلومتر)
 ساخت پل ۳/۶ میلیارد دلار. (۸۰۳ میلیون دلار به ازای هر کیلومتر)



ترافیک متوسط روزانه تونل Oresund



Table 1. Average daily traffic across the Øresund Bridge

Daily traffic	2001	2002	Growth
Passenger cars	7,290	8,472	16.2%
MC	67	71	6.3%
Vans, caravans	204	206	0.9%
Coaches	103	113	9.1%
Lorries	421	493	17.1%
Total	8,085	9,354	15.7%

Passenger Journeys

Cars	21,880	24,070	10.0%
Train	13,570	14,720	8.5%
Total	35,450	38,790	9.4%



نحوه اتصال تونل مستغرق به تونل حفاری شده

- Bored tunnels to enter immersed tunnel

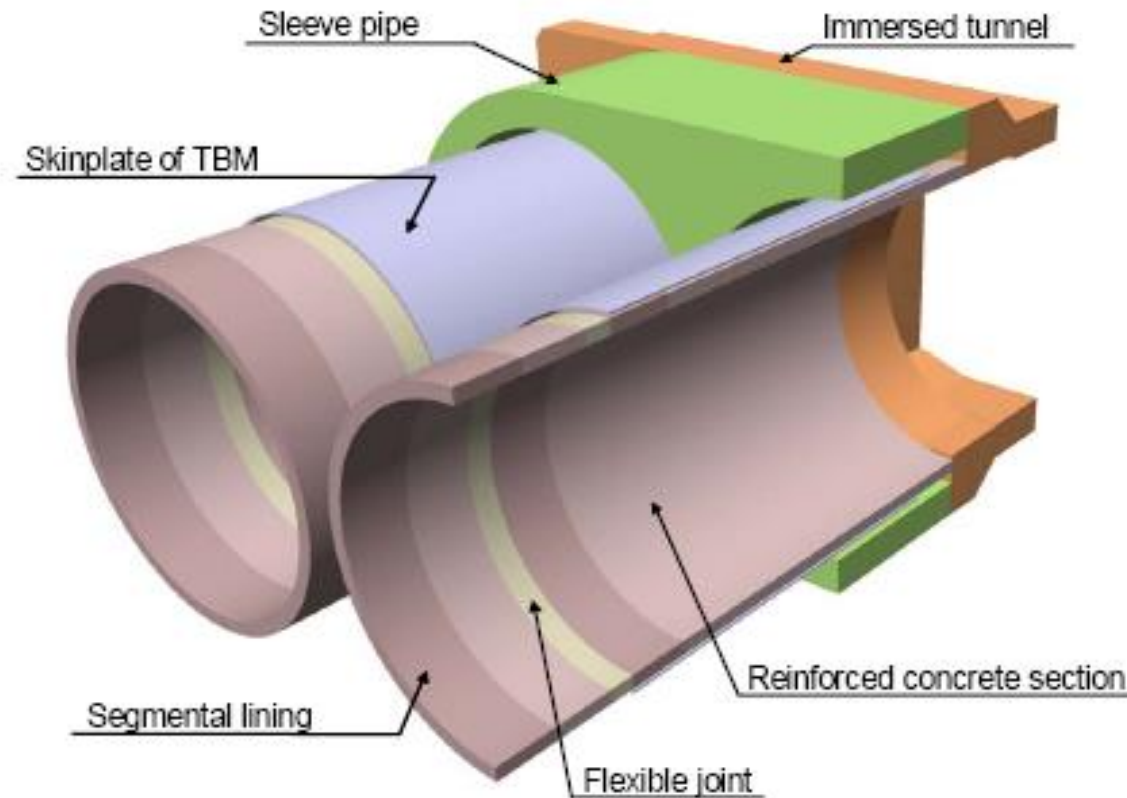


Figure from the Basic Design by Taisei-Gama-Nurol JV





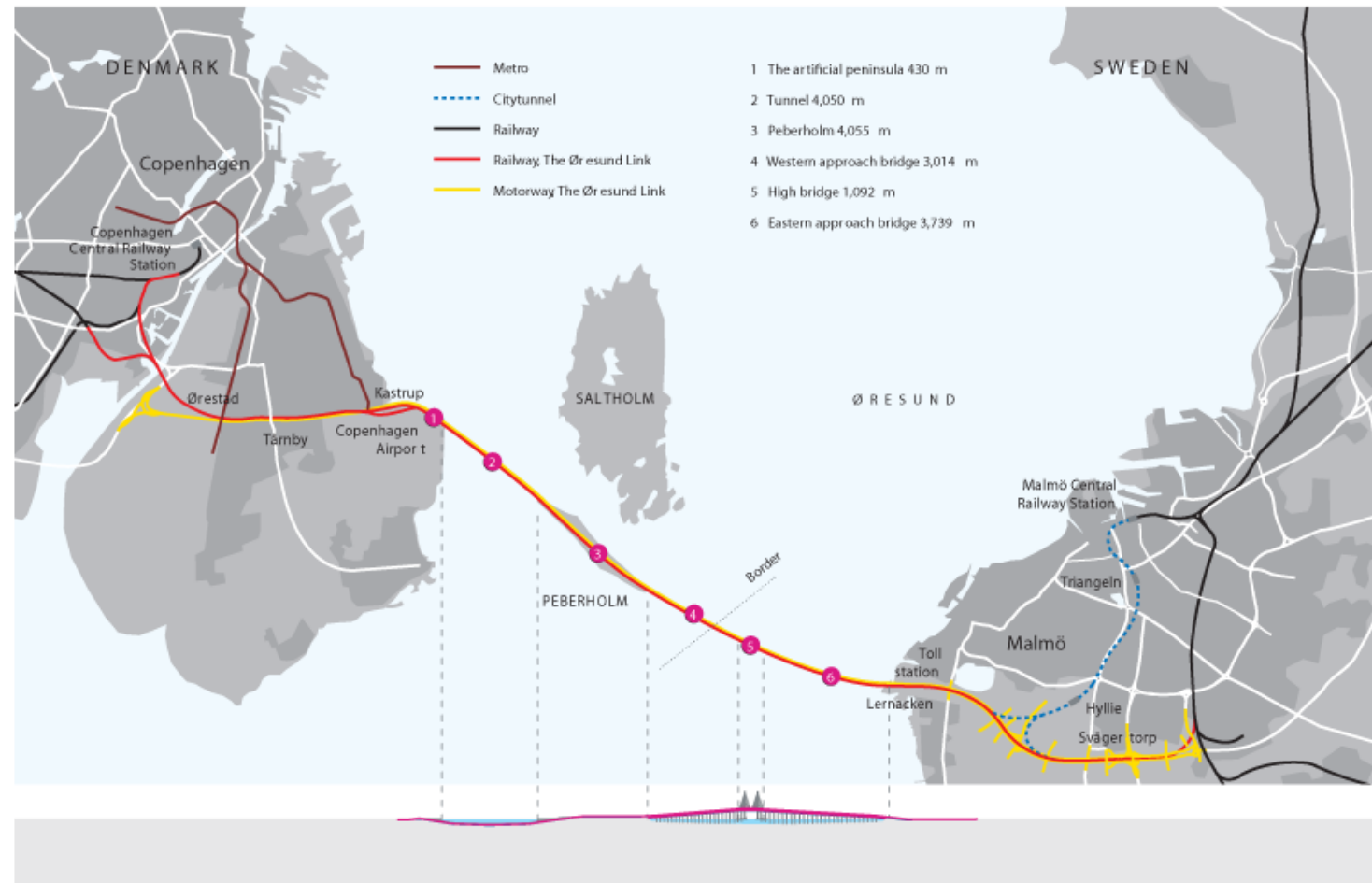












Beyond Plan B, author: T. Maier







