

Grundläggning med slitsmursteknik - Litteraturstudie

Ellen Thunstedt

Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet



Grundläggning med slitsmursteknik

- Litteraturstudie

Ellen Thunstedt



LUND
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5134, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2023

Examensarbete, Rapport 5134, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2023

Grundläggning med slitsmursteknik – Litteraturstudie

Ellen Thunstedt

Report 5134

ISRN LUTVDG/TVBM-23/5134-SE

Antal sidor/Number of pages: 88

Illustrationer/Illustrations: 82

Sökord

Slitsmur, grundläggning, sekantpåle, stålspont, geokonstruktion, stödvätska, bentonit, stödkonstruktion

Keywords

Diaphragm wall, foundation, secant pile, sheet pile, slurry, bentonite, retaining wall

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023

Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

Byggnadsmaterial
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Division of Building Materials
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden
www.byggnadsmaterial.lth.se/english

Sammanfattning

En slitsmur är en geokonstruktion som utförs genom att paneler platsgjuts med marken som form. Panelerna bildar tillsammans en samverkande vägg. Tekniken är vanlig utomlands men fortfarande relativt ovanlig i Sverige. Behovet, och därmed intresset, av slitsmurar i Sverige växer dock i takt med förtätningen av städer och infrastrukturprojekt som kräver djup schaktning och anläggning. Kraven på låg omgivningspåverkan, såsom buller och vibrationer, kan vara väldigt restriktiva. I examensarbetet utreds slitsmurstekniken på ett tekniskt plan. Ändamålet är att hjälpa samtliga involverade parter i ett projekt, såsom beställare, projektörer och utförare, att jämföra möjliga tekniker och sedan utvärdera vilken teknik som är mest lämplig utifrån rådande krav och förutsättningar. I examensarbetet utreds även hur risker minimeras i de fall slitsmuren används.

Utredningen utfördes som en litteraturstudie samt att tekniska diskussioner med experter har hållits. Till att börja med utreddes fördelar och nackdelar med tre typer av geokonstruktioner som används i Sverige: stålspont, sekantpålar och slitsmur. Teknikerna jämfördes och identifierade förutsättningar och krav, såväl som dess skillnader och likheter summerades i tabellform. Sedan utreddes hur slitsmurstekniken historiskt har utvecklats över tid. Kända svenska projekt där slitsmuren har använts identifierades med ändamålet att på ett enkelt sätt överskådliggöra vilka projekt som kan användas för vidare studier inom området. För att minimera risker och optimera slutresultatet av en slitsmur krävs förståelse för tillverkningsprocessen av alla inblandade parter. Särskilt viktig är förståelsen för just denna teknik då utförandet skiljer sig markant från övriga frekvent använda geokonstruktioner i Sverige.

En fallstudie av *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, utfördes för att identifiera vilka svårigheter man hade, och därmed identifiera potentiella framtida risker. Svårigheterna i projektet visade sig vara direkt kopplade till geologin och hydrogeologin. Utifrån fallstudien och tekniska diskussioner om generella markförhållanden, är slutsatsen att så länge rätt parametrar om geologin, geotekniken och hydrogeologin är kända är det tekniskt möjligt att utföra slitsmuren. Med rätt parametrar avses frekvens, variation, hårdhet och storlek på block och berglager. I fallstudien utreddes även vilka förutsättningar och krav som ledde till att slitsmurstekniken valdes som metod. Det utreddes med ändamålet att påbörja insamlingen av information för framtida teknikval. I detta fall var förutsättningarna och kraven att tekniken skulle ha låg omgivningspåverkan och/eller kunna utföras till stort djup.

Den sammanfattande slutsatsen är att slitsmurstekniken inte ersätter någon teknik utan att samtliga tekniker behövs eftersom de har olika möjligheter och begränsningar. De lämpar sig därmed för olika förutsättningar. Vanligtvis nyttjas flera tekniker inom samma projekt eftersom förutsättningarna inom projektet ofta varierar. Vidare är slutsatsen att både tekniska faktorer, såsom korrekt utförande samt geologins, geoteknikens och hydrogeologins påverkan, och organisatoriska faktorer, såsom kommunikation och förståelse för processen, har stor påverkan på slutresultatet. Alltså är det av största vikt att kunskap om slitsmurstekniken på en teknisk nivå görs lättillgänglig för samtliga parter i alla faser.

Abstract

A diaphragm wall is a retaining wall which is produced as a cast in-situ concrete wall. The ground itself acts as formwork. The technique is widely used internationally but it is comparably still a rare technique in Sweden. However, the need, and therefore interest in Sweden for diaphragm walls is growing as the number of inner city infrastructure projects requiring deep excavations increases. The environmental requirements for such projects, for instance noise and vibration, can be very restrictive. This master thesis aims to investigate the diaphragm wall in a technical way. This is to help involved parts in a project, such as clients, designers and contractors, to compare potential techniques and evaluate which is most suitable according to demands and prevailing conditions on site. The assignment also considers how risks are minimized in cases where the diaphragm wall is used.

The study was conducted as a literature study and technical discussions were held with experts. Initially, a comparison was made of advantages and disadvantages between three types of retaining wall currently used in Sweden: sheet pile, secant piles and diaphragm wall. The techniques were compared and identified requirements and assumptions, as well as the techniques differences and similarities were summarized in tabular form. After that, an investigation of how historically the diaphragm wall has developed over time was conducted. Known Swedish projects where diaphragm walls have been used were identified. This was done to give an easy overview of which projects that can be used for future investigations. To minimize risks and optimize the result of a diaphragm wall, an understanding of the execution process is required by all parties involved. The understanding of this technology is especially important as the execution differs significantly from other frequently used retaining walls in Sweden.

A case study of the *E101 Malmö C nedre*, Malmö City Tunnel project, was carried out to identify the difficulties they had, and thus identify potential future risks. The difficulties of the project turned out to be directly linked to geology and hydrogeology. Based on the case study and technical discussions of the general ground condition, the conclusion is that as long as the correct parameters of the geology, geotechnology and hydrogeology are known, it is technically possible to perform the diaphragm wall. The right parameters refer to the frequency, variation, hardness and size of blocks and rock layers. The case study also investigated the requirements that led to the choice of diaphragm wall as a method with the purpose of initiating the collection of information for future projects. In this case, the requirements were that the used technology should have a low environmental impact and/or be able to be carried out to great depth.

The overall conclusion is that the diaphragm wall does not replace any other technology. All techniques are needed because they have different possibilities and limitations. Therefore, they are suitable for different conditions. Usually, several techniques are used within the same project because the requirements and assumptions within the project often vary. Furthermore, the conclusion is that both technical factors, such as correct execution and the influence of geology and hydrogeology, and organizational factors, such as communication and understanding of the process, have a major impact on the result. Therefore, it is of great importance that knowledge in a technical level of diaphragm walls is made easily accessible to all parties involved at all stages in the design and production phases.

Förord

Sommaren 2018 jobbade jag med förberedande arbeten på delprojekt *E02 Centralen*, Västlänken. I samma veva utfördes fullskaletester av slitsmurspaneler inför kommande slitsmursarbeten. Jag blev intresserad av tekniken och började söka information om den. Problemet var att information om tekniken på en övergripande teknisk nivå inte fanns att tillgå. Den information som fanns var antingen kortfattad och oteknisk och kunde läsas om i broschyrer med mera, eller så var informationen publicerad i tekniska rapporter med så detaljerade och tekniska förklaringar att det var svårt att bilda en helhetsbild. Där och då bestämde jag mig för att skriva detta examensarbete för att fylla i hållrummet av information däremellan.

Jag vill först och främst tacka mina handledare Anne Gordon, Jonas Magnusson och Per Lindh för all hjälp och stöttning. Er breda kunskap och ert stora engagemang har hjälpt mig genom hela processen. Ert stöd har varit ovärderligt. Jag vill även tacka Christian Scholz för sitt engagemang i arbetet. Med sin breda expertis och långa erfarenhet inom området har han inspirerat, kommit med input och hjälpt till med att staka ut riktningen på arbetet.

Ett stort tack till alla som har anordnat och engagerat sig i studiebesöken. Det gav ovärderlig input till arbetet. Jag vill även tacka alla kontorsmedarbetare som har mött mig med värme och stöd genom att bjuda in mig i er familjära atmosfär.

Slutligen vill jag rikta ett stort tack till vänner och familj för er stöttning och uppmuntran genom hela studieperioden, som betecknas avslutad med detta examensarbete.

Ellen Thunstedt

Lund, augusti 2023

Innehållsförteckning

1	Introduktion	3
1.1	<i>Syfte och frågeställningar.....</i>	4
1.2	<i>Avgränsningar</i>	4
1.3	<i>Metodik</i>	5
1.4	<i>Rapportens disposition</i>	5
2	Varför slitsmur?	6
2.1	<i>Stålspont.....</i>	7
2.2	<i>Sekantpålevägg</i>	9
2.3	<i>Slitsmur.....</i>	12
2.4	<i>Jämförelse och summering</i>	16
3	Slitsmurens historia	23
3.1	<i>Slitsmurar i Sverige</i>	24
4	Utförande av en slitsmur	25
4.1	<i>Förberedande arbeten</i>	27
4.2	<i>Styrvägg.....</i>	29
4.3	<i>Schakt och stabilisering</i>	34
4.4	<i>Rengöring av slitsen och dess stödvätska.....</i>	38
4.5	<i>Stoppelement.....</i>	40
4.6	<i>Armeringskorg</i>	43
4.7	<i>Undervattensgjutning.....</i>	47
4.8	<i>Kapning.....</i>	51
5	Fallstudie av E101 Malmö C nedre	53
5.1	<i>Entreprenad Malmö C nedre</i>	54
5.2	<i>Varför valdes slitsmur?</i>	55
5.3	<i>Markförhållanden och dess inverkan på produktionen</i>	57
6	Diskussion	66
6.1	<i>Teknisk diskussion.....</i>	66
6.2	<i>Organisatoriska faktorer</i>	72
6.3	<i>Ekonomi.....</i>	73
6.4	<i>En god arbetsmetod</i>	74
7	Slutsatser.....	76
8	Referenser	78

1 Introduktion

En slitsmur är i första hand en geokonstruktion som består av flera paneler som tillsammans bildar en sammanhängande betongvägg. Respektive panel tillverkas enligt en särskild metod. Metoden går ut på att en slits grävs i marken. Slitsschaktets väggar stabiliseras med stödvätska för att motverka kollaps. Sedan platsgjuts panelen med marken som form. Det är framför allt två saker gällande utförandet som utmärker slitsmurstekniken. Det första är att då panelerna utförs direkt i marken, stabiliseras slitsschaktet med stödvätska för att inte kollapsa. Det andra är att gjutningen utförs under stödvätskenivån, det vill säga som en undervattensgjutning. Se kapitel 4 för mer utförlig förklaring.

Fördelarna med slitsmurstekniken är att den har låg omgivningspåverkan avseende exempelvis låga buller- och vibrationsnivåer. Installationen påverkar inte heller rådande markförhållanden särskilt mycket, vilket leder till minskad sättningsrisk för omgivningen. Utöver låg omgivningspåverkan är väggen en styv konstruktion som vid höga laster får små deformationer. Därmed kan slitsmuren utföras till stora djup. Dessutom har slitsmuren få fogar eftersom panelerna är långa. Typiskt finns en fog var tredje till sjunde meter. Som jämförelse har en typisk stålspons fogar var 15 cm medan sekantpåleväggen har fogar var 100 cm, se kapitel 2. Färre fogar innebär färre läckvägar.

Slitsmurstekniken är vanlig utomlands och togs fram i Italien under 1900-talets mitt. I Sverige är metoden relativt ung, men växer i popularitet, se kapitel 3. Då den används över hela världen, har tillverkningsprocessen anpassats och utvecklats efter rådande förutsättningar. Inom samma land, om de geologiska förutsättningarna är olika, används olika produktionsmetoder. Exempelvis grävs slitsen ut antingen med gripskopa eller fräs. Vidare kan den utföras med tvärväggar och stag eller som en bakåtförankrad konstruktion. För att studera anpassningen av utförande krävs projektspecifika fallstudier. Den generella tillverkningsprocessen av slitsmuren är dock densamma oavsett vart i världen man befinner sig.

Idag är det svårt att hitta lättillgänglig information om slitsmuren i spannet mellan enkel och komplex information. Då slitsmuren inte är en traditionell konstruktion i Sverige, ingår tekniken inte i undervisningen på de tekniska högskolorna. Det finns gott om enkel, övergripande och kortfattad information att hitta via Youtube eller på entreprenörernas hemsidor. Det finns också gott om komplex information såsom tekniska publikationer, rapporter och vägledningar. För att förstå vad som menas i dem behöver man vara tillräckligt insatt i slitsmurstekniken från början. Den tekniska informationen kan vara svår att få tag på och man måste veta vad man letar efter för att hitta den. Dessutom kostar den ibland pengar. Spannet mellan de två ytterligheterna enkel och komplex information, behöver minskas.

I det svenska arbetet mot en mer hållbar framtid, när städer ska förtätas, krävs alternativa metoder till våra konventionella. Slitsmuren är en av de alternativa metoderna. Slitsmuren är en styv konstruktion som öppnar upp möjligheter att schakta till stort djup med låga störningar och låg påverkan på omgivningen. För att metoden ska kunna användas måste kunskap om den spridas. En metod som är främmande förblir främmande.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med arbetet är att belysa slitsmurstekniken för att bredda kunskapen inom den svenska marknaden.

Mer specifikt är syftet att utreda slitsmurens funktion, historia och utveckling samt utförandet av slitsmuren. Syftet är även att bygga upp en kunskapsbank där erfarenhet från svenska projekt samlas med ändamålet att användas som grund till framtida teknikval. Även att identifiera risker och faktorer som optimerar resultatet av slitsmuren.

Frågeställningar att undersöka:

- 1) Vad är slitsmurens funktion, möjligheter och begränsningar, samt vilka andra tekniker är jämförbara?
- 2) Vilka förutsättningar och krav avgör valet av teknik?
- 3) Hur har slitsmurstekniken utvecklats och hur utförs den idag?
- 4) Vilka risker finns och vilka faktorer optimerar resultatet av slitsmuren?

1.2 Avgränsningar

Slitsmuren kan användas som temporär konstruktion, exempelvis som stödväggar vid schakt, eller som permanent konstruktion, inledningsvis som stödväggar och sedan som en del av den permanenta konstruktionen. Oavsett i vilket skede slitsmuren ska användas kategoriseras den som en geokonstruktion. Alltså ska geokonstruktionskoderna alltid tillämpas. I de fall den ska användas i permanent skede, faller slitsmuren även över till byggnadsverk. Då ska både byggnadsverkskoderna och geokonstruktionskoderna tillämpas. Slitsmur som geokonstruktion är det som främst fokuseras på i detta arbete. I det permanenta stadiet behövs även hänsyn tas till beständighet. En avgränsning i arbetet är att armering eller betong inte studeras. En avgränsning är att endast slitsmurstekniken utförd med stödväska med bentonitlera undersöks.

Slitsmurar är ett brett begrepp som innefattar slitsmurskonstruktioner med olika ändamål och som därmed utförs på olika sätt. Ändamålen kan vara allt från avskärmning av föroreningar till konstruktioner som är bärande. Beroende på ändamål kan slitsmurarna även vara oarmerade och delvis bestå av prefabricerade element. I huvudsak kan utförandet kategoriseras i två delar: enstegskonstruktion eller tvåstegskonstruktion. Enstegskonstruktionen innebär att slitsschaktet stabiliseras och gjuts i ett och samma steg, det vill säga att slitsschaktet fylls med cementmixad stödväska som härdar. Tvåstegskonstruktionen innebär att slitsarna först schaktas och stabiliseras med stödväska. Sedan gjuts slitsarna. I arbetet görs en avgränsning där endast slitsmurar utförda med platsgjuten armerad betong studeras eftersom det är en lastbärande konstruktion. Det är denna typ av konstruktion som är lämplig vid större anläggningsprojekt.

På grund av att examensarbetet är tidsbegränsat undersöks ett av de svenska projekt som presenteras i kapitel 3.1, *E101 Malmö C nedre*, Malmö Citytunneln.

1.3 Metodik

Examensarbetet utförs som en litteraturstudie.

I arbetet utförs även:

- Fallstudie – delprojekt *E101 Malmö C nedre*, Malmö Citytunneln (Kapitel 5)
- Studiebesök – för förståelse om tekniken och utförandet

Utöver ovanstående har diskussionsmöten hållits och personlig kommunikation med experter inom området har ägt rum.

Arbetet skrivs på svenska då examensarbetet riktar sig mot en svensk marknad.

1.4 Rapportens disposition

Efter ett inledande kapitel beskrivs och jämförs metoderna stålspont, sekantpålar och slitsmur övergripande. Metoderna har valts eftersom de är de mest jämförbara när det kommer till större anläggningsprojekt. Metodernas fördelar och nackdelar presenteras för att belysa att vilken metod som är lämplig beror på vilka förutsättningar som råder. Vidare i rapporten fokuseras på slitsmurstekniken.

Sedan beskrivs slitsmursteknikens historia. Det vill säga, hur och när tekniken kom till. Historisk utveckling av tekniken ger djupare förståelse för varför tekniken finns och varför den ser ut som den gör i dagsläget. I detta kapitel berörs även vilka svenska projekt som pågår och har slutförts.

Vidare beskrivs tillverkningsprocessen för att fylla ut mellanrummet mellan den enkla och detaljerade informationen som finns att tillgå idag. Det görs för att läsaren ska få en bredare inblick i tekniken. Ytterligare förklaras processen eftersom utförandet avgör metodens praktiska möjligheter och begränsningar. Utförandet avgör även till stor del slutresultatet av slitsmuren.

Efter tillverkningsprocessen följer en fallstudie av projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Projektet har valts ut eftersom det är avslutat och erfarenhetsåterföring och andra rapporter har presenterats. Syftet med fallstudien är att ta reda på vid vilka förutsättningar slitsmurstekniken är ett lämpligt metodval. Fokus är på varför slitsmurstekniken valdes som stödkonstruktion samt vilka geologiska och hydrologiska förutsättningar som gällde.

I diskussionen diskuteras risker och hur de kan åtgärdas utifrån presenterad information tidigare kapitlen. Sedan dras slutsatser.

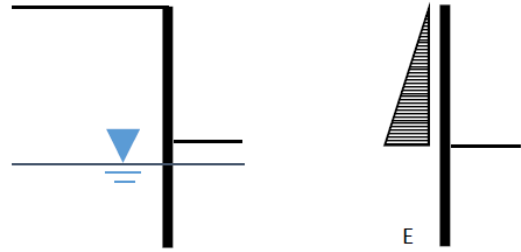
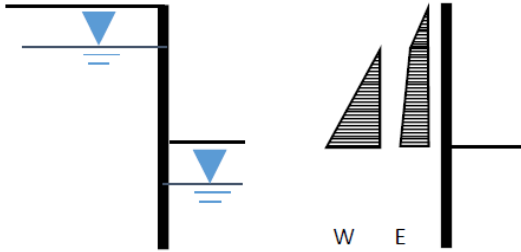
2 Varför slitsmur?

Det finns många olika typer av stödkonstruktioner som kan användas vid schakter. Samtliga har fördelar och nackdelar. Vilken eller vilka metoder som till sist används beror på förutsättningarna och vilka krav som ställs, både i temporärt och permanent skede.

I kapitel 2 görs en övergripande jämförelse mellan vanliga stödkonstruktioner, se Tabell 1. De tre metoderna stålspont, sekantpålning och slitsmur är möjliga kandidater vid större anläggningsprojekt. Därför beskrivs metodernas möjligheter och begränsningar i separata avsnitt för att visa på metodernas skillnader. För mer djupgående information hänvisas läsaren till annan litteratur. Jämförelsen baseras på tekniska diskussioner som hölls i Lund på Lunds tekniska högskola den 13:e och 14:e juni 2023. Utöver de två mötesdagarna baseras jämförelsen till stor del på personlig kommunikation och material från Prof. Dr. -Ing. Christian Scholz, idag professor vid Bremen universitetet och driver konsultbolaget S&C Consult GmbH. Tidigare har Scholz även arbetat som entreprenör för olika bolag som utför slitsmurar. I det arbetet har han utfört slitsmurar runt om i världen. Scholz har över 20 års erfarenhet av slitsmurar.

Vid valet av metod behöver man först besluta om huruvida stödväggen ska vara genomsläpplig eller tät. Följden av valet är att om väggen är genomsläpplig behöver konstruktionen endast ta jordtrycket. Om konstruktionen är tät ska den ta både jord- och vattentrycket, se Figureerna 1 och 2 i Tabell 1 nedan. I tabellen listas metoder för jämförelse. I senare avsnitt förklaras stålspont, sekantpålevägg och slitsmur närmre. Vissa metoder, som stålspont och armerad sprutbetong, är vanliga i Sverige medan andra är vanligare utanför Sverige (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Tabell 1 – Möjliga metoder att använda beroende på vattentäthetskrav samt styvhetskrav.
Gul markering = vek konstruktion. Blå markering = styv konstruktion

<p style="text-align: center;">Genomsläpplig vägg</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figur 1 - Modell med jordtryck (Scholz 2020)</i></p>	<p style="text-align: center;">Tät vägg</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figur 2 - Modell med jord- och vattentryck (Scholz 2020)</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> • Stålspont, utan tätning 	<ul style="list-style-type: none"> • Stålspont, med tätning
<ul style="list-style-type: none"> • Borrpålevägg 	<ul style="list-style-type: none"> • Sekantpålevägg
<ul style="list-style-type: none"> • Armerad sprutbetongsvägg 	<ul style="list-style-type: none"> • Slitsmur

För både genomsläppliga och täta väggar finns veka och styva konstruktioner. Styvhet är en teknisk term som visar på deformation vid belastning. En styv konstruktion kan belastas med

större laster samtidigt som deformationerna är begränsade. En mindre styv konstruktion deformeras tidigare än en styv konstruktion när den belastas. Den mindre styva konstruktionen kan även kallas för vek. En konstruktions styvhet beror på flera faktorer. Några som kan nämnas är: tvärsnitt, längd och materialets elasticitetsmodul. Även olika typer av belastning, såsom drag- eller tryckkraft, samt typ av upplag påverkar styvheten. Det är alltså många faktorer som avgör om en konstruktion betraktas som styv eller vek. Dessutom kan samtliga konstruktioner anpassas för att öka eller minska styvheten. Trots att samtliga stödkonstruktioner kan anpassas för att få önskad styvhet, kan en generell klassificering göras. Klassificeringen syns som färgmarkering i Tabell 1. Veka konstruktioner markeras med gult i Tabell 1 medan styva konstruktioner är blåmarkerade. Av de tre jämförande metoderna är stålsponten den veka konstruktionen. Resterande metoder består av armerad betong i någon form vilket ökar styvheten (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

2.1 Stålspont

Stålspont består oftast av relativt tunna valsade stålprofiler som installeras i marken. För att stålprofilerna ska samverka låses de ihop med varandra genom enkla låsningar längs med profilerna. Att använda stålspont som stödkonstruktion är en gammal och väletablerad metod i Sverige. Många i Sverige kan dimensionera en stålspont. Maskiner, material och duktiga utförare finns det också gott om i Sverige. Metoden kräver inte någon stor arbetsyta vid utförandet. Däremot krävs förvaringsyta av sponter. Sponterna kan efter avslutat arbete ibland dras upp och återanvändas. Konstruktionen kan förbättras och anpassas genom förstärkning, exempelvis hammarband för att fördela lasten över konstruktionen (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Exempel på förstärkt stålspont visas i Figur 3.



Figur 3 - Exempel på hur en förstärkt stålspontkonstruktion kan se ut. Fotografiet är från E02 Centralen, Västlänken

Stålspont som stödvägg används vanligtvis i det temporära skedet. Stålspont kan även användas för permanent bruk, exempelvis som en del i den permanenta kajkonstruktionen i hamnar (Muntlig kommunikation). Däremot, om den permanenta konstruktionen består av en vattentät betongvägg kan inte stålsporten nyttjas som en del av den permanenta betongkonstruktionen, såsom sekantpålar eller slitsmur kan. Se följande avsnitt för mer information.

Nackdelarna med stålspont är att det är en relativt vek konstruktion. Veka konstruktioner är begränsade i djupled. Ytterligare påverkas omgivningen mer om veka konstruktioner används. Det är på grund av att konstruktionen deformeras till följd av jord- och vattentrycket som ökar risken för sättningar.

Ytterligare nackdel är att stålsporten bara kan drivas i lösare material. Det är alltså problematiskt om det finns hårda block i marken. Om sponten ska drivas till berg är det även svårt om berget är ojämnt eller sluttande. I dessa fall kombineras ofta stålsporten med jetinjektering och ibland, efter framschaktning av sponten, även med en betongbalk som gjuts och sedan dubbas i berget (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Jetinjektering utförs med borrhög där en borrhög med injekteringsmunstycke borrar ned i marken. Injekteringen sker genom att borrhögen roterar och dras upp ur marken samtidigt som en cementblandning sprutas ut ur munstycket. Cementblandningen sprutas ut under högt tryck vilket eroderar bort och ersätter finpartiklarna i marken. På så sätt stabiliseras och tätas området (Hercules u.å.). Observera att det på grund av det höga injekteringstrycket finns stor risk för upplyftning av marken då jetinjektering används (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Vidare kan stålspont utföras tillsammans med sprutbetong för att också bergschakten ska stabiliseras. Det gjordes på projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, vilket kan läsas mer om under kapitel 0. I övergången mellan stålsporten och sprutbetongen som bergsförstärkning krävs injektering för att minska vatteninflödet.

Att driva stålspont med fallhejare eller vibration är högljutt och genererar vibrationer. I vissa fall med lösare jordar, som silt och lera, kan silent piler användas. Silent piler är ett spontaggregat som används för att trycka ner spontplank utan vibrationer. Metoden kräver dock att några spontplank installeras enligt vanligt utförande, det vill säga vibrationsgenererande utförande. Silent pilern, monteras på den redan installerade sponten som den klämmer sig fast vid för att trycka ner nästkommande spontplank.

Då stålspontkonstruktioner inte är helt täta kan injektering eller jetinjektering användas för att minimera en grundvattensänkning. Även en viss grundvattenpåverkan är oftast ofrånkomlig. Både injektering och grundvattensänkning påverkar omgivningen negativt och kan vara kostsamma. Vid en återinfiltration för att kompensera för en grundvattensänkning krävs rent vatten eller renat uppumpat vatten för att inte påverka grundvattnet eller injekteringsbrunnarna (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

2.2 Sekantpålevägg

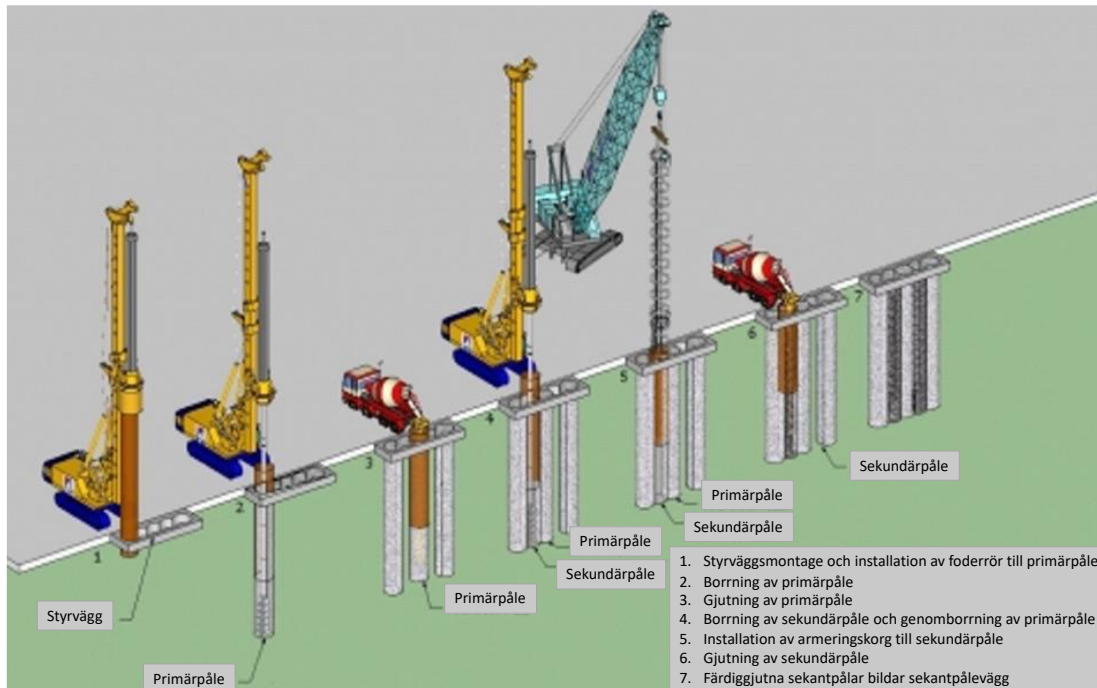
En sekantpålevägg består av platsgjutna betongpålar. Pålarna överlappar varandra för att bilda en sammanhängande vägg. Figur 4 nedan visar exempel på en sekantpålekonstruktion. För denna vägg har två förankringsnivåer använts.



Figur 4 - Exempel på hur en sekantpålevägg kan se ut (Fotografi: Christian Scholz u.å.)

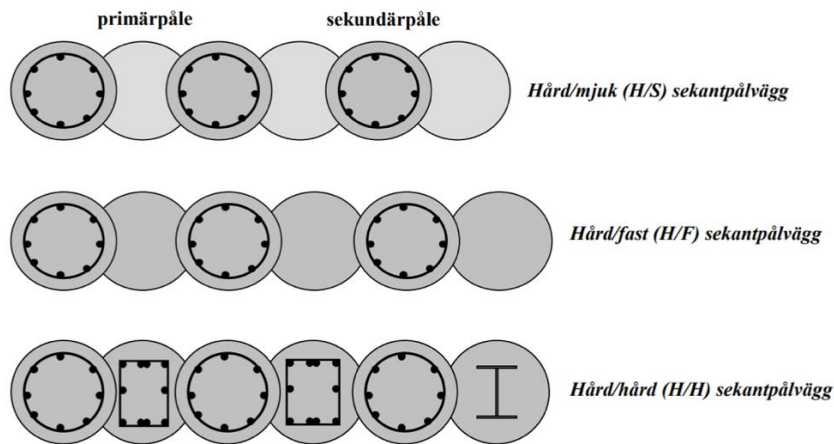
En sekantpålekonstruktion är generellt vekare än en slitsmur, men styvare än en stålsponskonstruktion. Det är framför allt kapaciteten i böjning som är högre för sekantpålen jämfört med stålsporten. I jämförelse med slitsmurar, är armeringen i en sekantpåle inte optimalt placerad i tvärsnittet (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Se mer i avsnitt 2.4.

Sekantpåleväggens tillverkningsprocess visas i Figur 5. De så kallade primära pålarna tillverkas först, steg 1–3 i Figur 5. Därefter, steg 4–7 i Figur 5, tillverkas de sekundära pålarna. Till att börja med gjuts en styrvägg med ändamålet att styra pålarnas position så att de hamnar rätt. Med samma ändamål används styrväggar vid tillverkning av slitsmurar. Mer information om styrväggen finns under avsnitt 4.2. Efter styrväggen installeras ett stålrör, så kallat foderrör, i marken för stabilisering av schaktet och formväggar, samtidigt som materialet i marken borrar ur. Sedan gjuts pålen. När pålen är tillräckligt styv dras foderröret upp. Proceduren upprepas med jämna mellanrum i marken för att inte störa härdningsprocessen av den tidigare utförda pålen. Dessa kallas för primära pålar.



Figur 5 - Tillverkningsprocess av sekantpålsvägg, uppdelad i 7 delprocesser. Redigerad figur (Scholz u.å.)

De sekundära pålarna borraras mellan de två angränsande primära pålarna, steg 4 i Figur 5 ovan. För att pålarna ska samverka och sluta tätt borraras de sekundära pålarna delvis genom de två angränsande pålarna, se Figur 6 för exempel.



Figur 6 - Olika varianter av sekantpålsvägg. Notera att sekundärpålen delvis borraras igenom den primära pålen (Troughton 2003 se Åhnberg 2004, s. 9)

Beroende på önskad styvhet, kapacitet och ändamål på den färdiga stödväggen kan olika betongklasser och olika mängd armering tillämpas för de olika pålarna. Om olika betongklasser tillämpas utförs primärpålen med lägre betongklass medan sekundärpålen utförs med högre betongklass. Se översta exemplet i Figur 6 där pålarnas färgskillnader representerar olika betongklasser. Den mittersta raden i Figur 6 visar en väggtyp där pålarna har samma betongkvalitet. Av praktiska anledningar är vanligtvis varannan påle, sekundärpålar, armerad. Förklaringen till det är att de sekundära pålarna utförs genom att delvis genomborra de två angränsande primära pålarna. För att inte riskera att borra igenom de primära pålarnas

armering är det vanligt att de primära pålarna är oarmerade. För att öka väggens styvhet används därför i första hand mer armering i de sekundära pålarna. Vid högre krav kan sekantpåleväggen utformas med armering i varje påle. Då är det viktigt att utforma armeringen i primärpålarna så att risken för genomborrning minimeras (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Figur 6 visar på sista raden två utformningsexempel av primärpålars armering: rektangulär form eller I-balk.

Sekantpålemetoden kan användas till ett djup så stort som 40–50 m vid optimala förhållanden. Hur djupt de kan drivas beror på många faktorer varav några är: krav på toleranser, pålarnas diameter och markförhållanden (Christian Scholz, 31 juli 2023). Enligt den italienska tillverkaren Soilmec S.p.A kan sekantpålar vanligtvis drivas till ett maximalt djup på ungefär 28 meter (Soilmec 2016a). En anledning till att det finns ett maximalt djup är att de vertikala avvikelserna ökar med djupet. En sekantpåle bör enligt svensk standard för utförandet maximalt avvika 2 % i vertikalled (SS-EN 1536:2010+A1:2015). Det är vanligt att beställare ställer högre krav än så. Enligt Scholz är en avvikelse på 1 % ett vanligt krav (Christian Scholz, 31 juli 2023). Enligt Soilmec S.p.A kan en vertikal avvikelse i optimala fall vara så låg som 0,5 % (Soilmec u.å.). Då sekantpålekonstruktionen fungerar genom att pålarna borrar in i varandra, är konsekvensen vid djupare konstruktioner att pålarna inte sluter tätt mellan varandra. Därmed uppstår problem med både vattentäthet och att väggen inte samverkar (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Sekantpålar kan utföras i både lös och hård geologi, det vill säga i både jord och berg. Detta tillsammans med att sekantpålar kan utföras till relativt stora djup kan utnyttjas för att minska risken för stora vattenflöden när stödväggen står färdig. Genom att utföra pålarna till ett djup där mindre vattenförande lager finns, skärmas vattenflödet av vilket kräver mindre injektering. Under tillverkningen krävs inte heller någon injektering av marken för att minska vattenföringen eftersom foderrör används. När installationen är färdig bildar sekantpåleväggen en barriär för vattenföringen, vilket också innebär att ingen injektering brukar behövas.

Metoden kräver inga stora arbetsytor. Däremot krävs upplagsytor för de vanligtvis färdigsvetsade armeringskorgarna och foderrören.

Sekantpåleväggen kan, till skillnad från stålsponten, användas som en del i den permanenta betongkonstruktionen vilket är en fördel. I det fallet tar sekantpålarna jordtrycket medan en platsgjuten innervägg tar vattentrycket. Däremot, om sekantpåleväggen endast ska användas i temporärt skede kan väggen till skillnad från stålsponten inte återanvändas, vilket är en nackdel.

Internationellt är sekantpålning en välkänd och beprövad metod. I Sverige har den använts i flera projekt och intresset för metoden växer. Nackdelen är att det inte finns någon svensk entreprenör som kan utföra sekantpålar och därmed finns begränsad kompetens inom Sverige. Det i sin tur medför olika svårigheter, såsom att man behöver vara ute i god tid och större kostnader då både personal och maskiner behöver förflyttas till Sverige.

Tillverkningen av sekantpålar genererar störningar i form av ljud då man borrar. Metodiken är dock oftast tystare än för en slagen eller vibrerad spont. Ljuddämpare runt arbetsområdet kan vanligtvis användas. Det finns även många fogar per meter vilket aldrig är en fördel (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

2.3 Slitsmur

Slitsmuren är den styvaste av alla stödkonstruktioner. Slitsarna är djupa i förhållande till sitt tvärsnitt. En slitsmur har en typisk vertikal avvikelse på 0,5 %, vilket är en lägre avvikelse än sekantpålarna i de allra flesta fall (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). I optimala fall kan avvikelserna vara ännu lägre, vilket var fallet då förbättringar av Londons kombinerade dag- och avloppssystem påbörjades år 2010. Slitsmurarna utfördes till ett djup på upp till 98 m. De flesta slitsarna utfördes med en avvikelse runt 1:500, det vill säga 0,5 %. Vissa slitsar däremot hade en avvikelse på så lite som 1:800, vilket betyder en avvikelse på 12,5 cm på 100 m djupa slitsar (Stanley, Sayavong, Hard, Gatward & Puller 2014).

En stor skillnad mellan sekantpålkonstruktionen och slitsmur är att slitsmurens slitsar inte behöver grävas in i varandra för att få fullgod funktion på väggen. Det behöver sekantpålarna göra. Därmed är sekantpåleväggen känsligare för avvikelser än vad slitsmuren är. Den låga avvikelserna är en av faktorerna som möjliggör att slitsmuren kan utföras till mycket stort djup (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Den österrikiska riktlinjen för slitsmurar säger att ett vanligt djup för slitsar är mellan 30-150 m. Det maximala djupet är 250 m om fräs används eftersom fräsaggregatet har högre kapacitet än gripskopsaggregatet (Deix 2019, s. 41). Figur 7 visar exempel på hur en slitsmur ser ut.

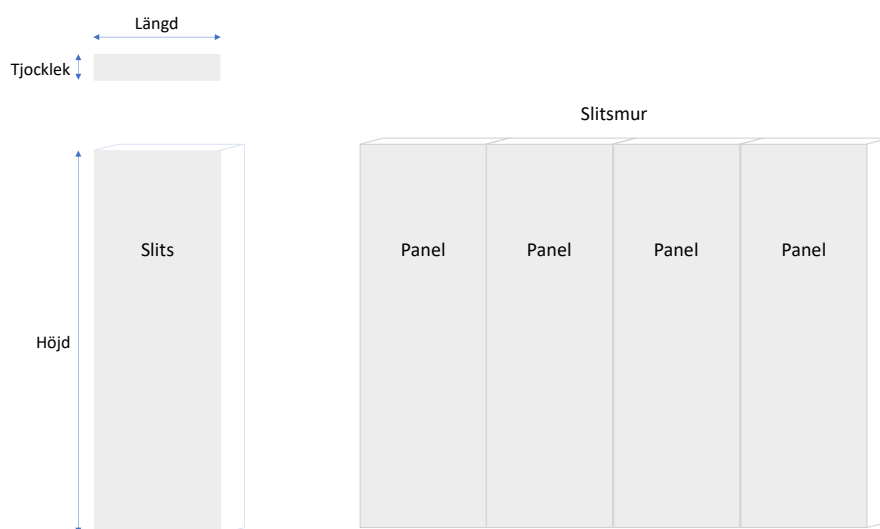


Figur 7 - Exempel på hur en slitsmur kan se ut (Fotografi: Per Lindh 2006)

En mer detaljerad beskrivning av tillverkningsprocessen finns i kapitel 4. Slitsmursväggen består av flera separat tillverkade paneler som tillsammans bildar en kontinuerlig vägg. Panelerna är vanligtvis rektangulärt formade men kan ha annan form om högre böjmotstånd krävs, exempelvis ett T-tvärsnitt. Ett verkligt exempel på när ett T-tvärsnitt användes i Sverige är när Filbornaverket byggdes i Helsingborg (Christian Scholz, 26 april 2023).

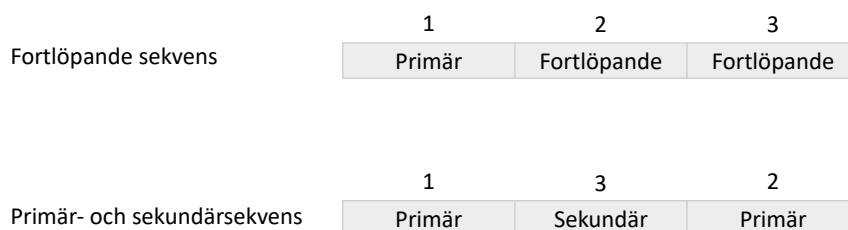
Notera att både *slits* och *panel* används för att beskriva slitsmurens paneler. Det beror på att respektive benämning används för olika tillfällen. Slits är benämningen på schaktet, det vill säga hålet som grävs fram. I slitsschaktet placeras sedan fogar och armering. Panelen gjuts därefter och det är slitsmurspaneler som tillsammans bildar en slitsmur.

Panellängderna varierar vanligtvis mellan 3–7 m men kan vara så långa som 9 m (Christian Scholz, 31 juli 2023). Det betyder färre fogar längs stödväggen än för stålspons och sekantpålevägg. Färre fogar per längdmeter minimerar risker ur flera avseenden, varav den främsta är lägre risk för läckage. Enligt Scholz varierar tjockleken på panelerna, och därmed tjockleken på stödväggen, mellan 0,6–1,8 m (Christian Scholz, 31 juli 2023). Se Figur 8 för definition av panelernas längd, tjocklek och höjd.



Figur 8 – T.v. Definition av slitsens längd, tjocklek och höjd. Notera att ordet *slits* används för slitsschaktet. T.h. Efter gjutning och härdning av slitsschaktet benämns slitsen i stället *panel*. Panelerna utgör slitsmuren.

De första panelerna som tillverkas kallas för primära paneler. De tillverkas på säkert avstånd från varandra för att inte påverka eller påverkas av varandra. Om mejsling eller blästring används vid senare slitsschakt är det viktigt att de tidigare utförda panelerna har uppnått tillräcklig hållfasthet för att inte påverkas (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Därefter tillverkas resterande paneler. Till skillnad från sekantpålarna där de primära pålarna i många fall är oarmerade, består samtliga paneler av samma betongtyp och armeringsmängd. De två vanligaste tillverkningssekvenserna är antingen fortlöpande sekvens, övre raden i Figur 9, eller primär- och sekundärsekvens, sista raden i Figur 9. En mix av båda kan också användas (Christian Scholz, 31 juli 2023).



Figur 9 - Tillverkningssekvenser av slitsmur. Baserad på mötesskiss (Christian Scholz, 31 juli 2023)

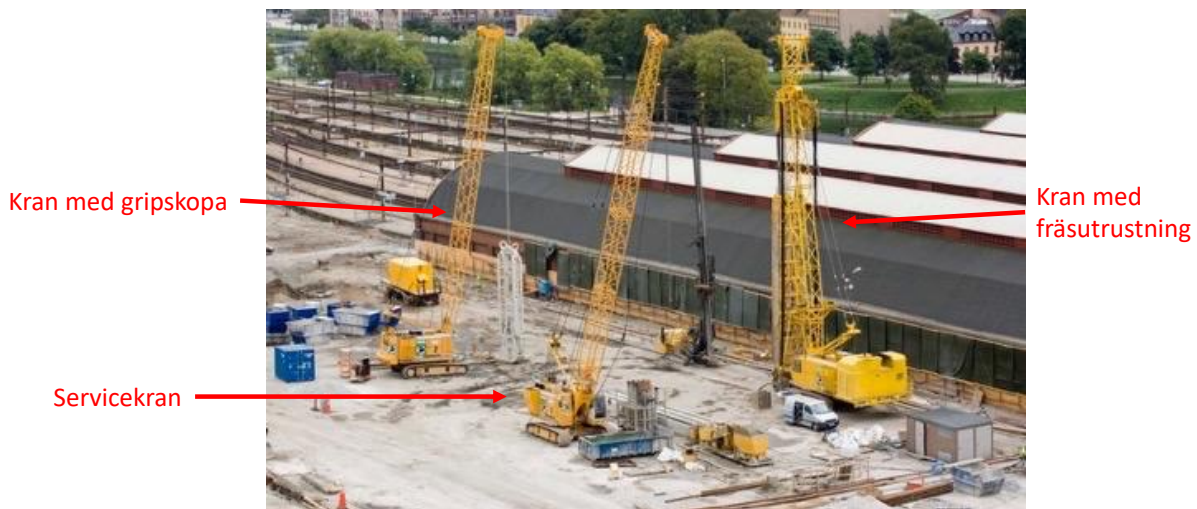
Vad som utmärker slitmurstekniken jämfört med de andra metoderna, är att stödvätska används för att stabilisera slitsschakten. Det innebär många fördelar varav en är att djupa schakter kan utföras. Nackdelen är att stödvätskan måste hanteras vilket kräver en stor arbetsyta och omfattande logistikarbete. Stödvätskan måste kontrolleras så att den uppfyller stabiliseringskravet samt att den vid gjutningen måste vara ren. Därmed krävs en stödvätskeanläggning inne på arbetsområdet som tillverkar, pumpar och renar stödvätskan, se Figur 10 för exempel på del av reningsanläggning från *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Utöver stödvätskeanläggningen krävs upplagsyta för de stora och tunga armeringskorgarna (Soilmec 2016b).



Figur 10 – Exempel på två delprocesser i reningsanläggningen som krävs för att rena stödvätskan.
T.v. Högar av separerade fraktioner. T.h. Sedimenteringsbassäng (Fotografi: Per Lindh 2006)

Utöver stödvätskeanläggningen och upplagsyta för armeringskorgarna finns ett allmänt behov av arbets- och transportyta. Det är för att underlätta och effektivisera tillverkningen av panelerna. Vanligtvis krävs minst två maskiner vid tillverkningen av en slits. Den första maskinen schaktar ur slitsen och är därmed utrustad med något typ av schaktaggregat. Den andra maskinen assisterar den första maskinen genom att utföra allt utöver schaktningen. Exempelvis genom att placera armeringskorgarna i slitsen och hantera gjutrören under gjutningen. Förutom de två nämnda maskinerna krävs vanligtvis ytterligare maskiner för att transportera schaktmassorna och armeringskorgen (Soilmec 2016b).

Figur 11 visar exempel på en slitmursarbetsplats där ytterligare en maskin krävdes på grund av hård geologi. För att schakta i det hårda berget krävdes en maskin utrustad med fräsaggregat, vilket kan läsas om i kapitel 5. Fotografiet är taget av Per Lindh på projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Vad som visas på bilden är tre större larvgående fackverkskranar i storleken 100–160 ton, vilket är standardstorlek på kranar och inte projektspecifika storlekar enligt Scholz (Christian Scholz, 31 juli 2023).



Figur 11 – Exempel på arbetsområde vid slitsmurstillverkning. Exemplet är från E101 Malmö C nedre, Citytunneln i Malmö. I figuren har de tre larvgående fjäkransarna som användes i projektet markerats med respektive funktion. Redigerat fotografi (Fotografi: Per Lindh 2006)

Gällande omgivningspåverkan är slitsmursmetoden en tyst metod. Därmed krävs inte någon bullerdämpning av arbetsområdet. Slitsmurar kan utföras nära byggnader eftersom den dels har låg påverkan på marken, dels tack vare att maskinerna inte tar så mycket plats. Hur nära byggnaden man i praktiken kan schakta behöver utredas från fall till fall och beror bland annat på geotekniska förhållanden, byggnadens känslighet och hur den är grundlagd. Om förhållandena är optimala kan man komma väldigt nära (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Enligt den österrikiska riktlinjen ska det minsta avståndet till närmsta byggnad som minst vara 200 mm (Deix 2019, s.41). Så nära som 200 mm från byggnader kan man inte komma med andra metoder.

Slitsmuren kan användas permanent både för sig själv och som en del i den permanenta konstruktionen. I diskussionen beskrivs skillnader i utförandet av permanent kontra temporär slitsmur vidare.

Precis som för sekantpålar är slitsmursmetoden en välkänd och internationellt beprövad teknik. I Sverige växer intresset för metoden på grund av dess tekniska fördelar. Nackdelen med metoden är densamma som för sekantpålar, det vill säga att det inte finns någon svensk entreprenör som kan utföra slitsmurar och att inhemska teknisk kompetens saknas (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

I likhet med sekantpålarna kan slitsmurar tillverkas i allt mellan lös jord och hårdare berg. Detta i kombination med att de kan utföras till stora djup kan utnyttjas för att minimera grundvattenflöden när slitsmuren står klar. Genom att tillverka slitsmuren till det djup som har ett mindre vattenförande lager, krävs mindre injektering. Det är samma princip som för sekantpålarna. Ytterligare likhet är att när slitsmuren har härdat utgör väggen en vattenavskärmande vägg (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

2.4 Jämförelse och summering

Efter en generell presentation av metodernas fördelar och nackdelar görs en mer ingående jämförelse med avseende på tre aspekter: schaktutrymme, stag och bakåtförankring samt nyttjandegrad av armering. Sedan summeras hela kapitel 2 i tabellform. Avsnitt 2.4 är genomgående baserat på de tekniska diskussioner som hölls på Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023.

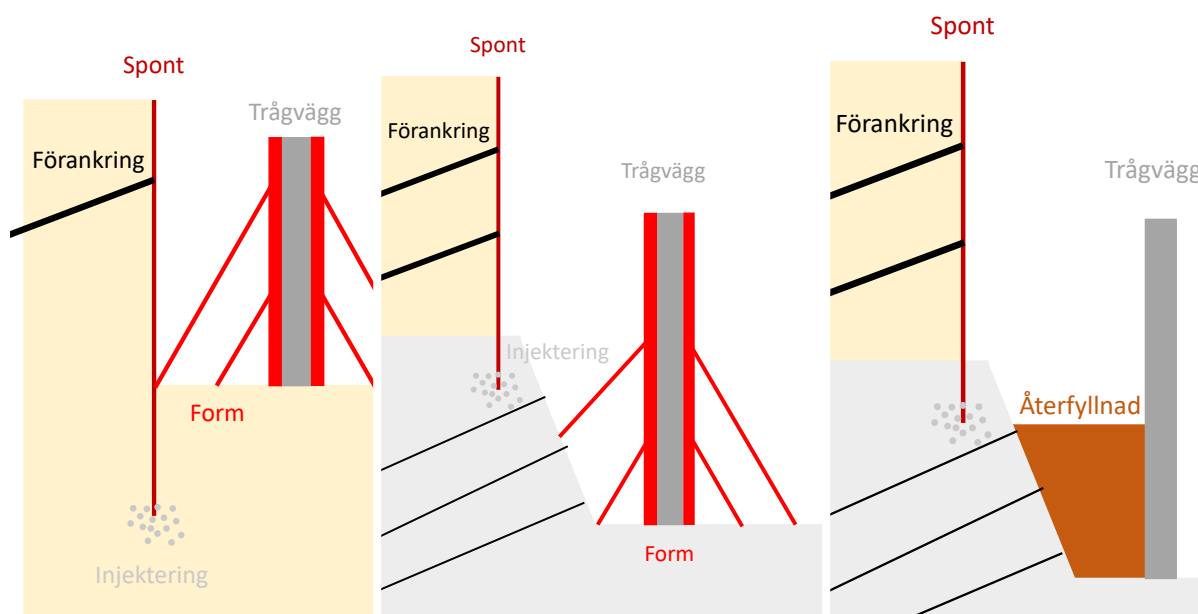
2.4.1 Schaktutrymme

Förutom att själva stödkonstruktionerna i sig har fördelar och nackdelar så påverkar konstruktionen även den fortsatta produktionen. Det är något som också bör tas i beaktning vid val av stödkonstruktion. Vad som menas med detta visas nedan där ett tunneltråg antas anläggas med metoden öppet schakt (engelska cut-and-cover). Med öppet schakt menas att man öppnar upp ett stort schakt till önskat djup. Schaktet stabiliseras med temporära stödkonstruktioner som installeras före schakt. Efter det anläggs den underjordiska konstruktionen, i detta exempel tunneltråget. Sedan återfylls schaktet.

En spontkonstruktion kan oftast inte vara en del av den permanenta konstruktionen. Det innebär att en tvåsidig form behöver användas för gjutning av tunneltrågets väggar. Det i sin tur innebär att extra utrymme behöver tas i anspråk för att få plats med form och manskap mellan spont och trågväggen, se Figur 12a (till vänster i Figur 12).

Om bergschakt dessutom ingår i stödväggen krävs ytterligare utrymme, se Figur 12b. Det beror på att bergväggen måste göras med en viss lutning. Väggen förstärks vanligtvis med bultar, sprutbetong eller armerad sprutbetong.

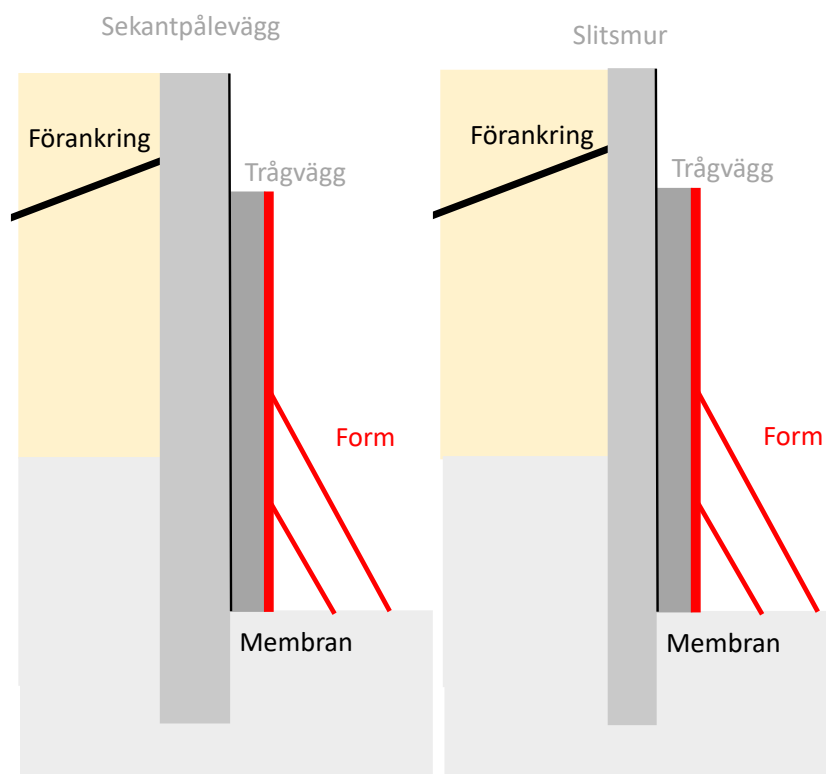
När trågväggen är gjuten och återfylld ska ske krävs mer fyllnadsmaterial eftersom ytan mellan stödkonstruktion och trågväggen är större, se Figur 12c.



Figur 12 - Anläggning av tunneltråg med stålspont som stödväggskonstruktion. Schematiskt utförande av ena tunnelväggen:
12a – Gjutning av tunnelväggen i jordschakt: krävs utrymme mellan spont och trågvägg eftersom tvåsidig form krävs
12b – Gjutning av tunnelväggen i jord- och bergschakt: krävs ytterligare utrymme eftersom bergschakten utförs med lutning
12c – Fortsättning på 12b: Krävs mer fyllnadsmaterial för att fylla ut volymen mellan spont och bergschakt och trågväggen

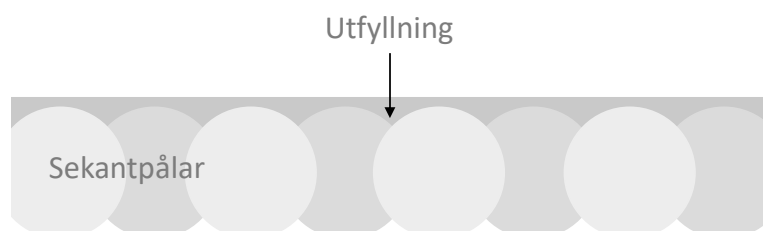
Om en sekantpålevägg eller slitsmur används som temporära konstruktioner, utförs tunnelväggen likt samma princip som för stålsponten, det vill säga dubbelsidig form. Det var fallet för E101 Malmö C nedre, Citytunneln i Malmö.

En sekantpålevägg och slitsmur kan likt tidigare nämnt vara en del av den permanenta konstruktionen. Det innebär att en enkelsidig form kan användas i båda fallen eftersom sekantpåleväggen eller slitsmuren agerar bakre formvägg, se Figur 13. Därmed behövs inget extra utrymme tas i anspråk. Ett membran eller liknande fästs på stödstrukturen för att transportera bort fukt mellan väggarna. Sedan formas trågväggen med en ensidig form.



Figur 13 - Anläggning av tunnel med sekantpålevägg (t.v.) och slitsmur (t.h.) som stödväggskonstruktion. Här kan ensidig form användas vilket tar mindre utrymme i anspråk jämfört med tvåsidig form. Jämför med figur 12

Skillnaden mellan sekantpålar och slitsmur är att utrymmet mellan sekantpålarna måste fyllas ut för att få en plan vägg, se Figur 14. Slitsmuren är plan från början.



Figur 14 - Utfyllnad av sekantpåleväggens ojämnheter för att erhålla en plan yta att fortsätta anlägga mot

2.4.2 Stämp och bakåtförankring

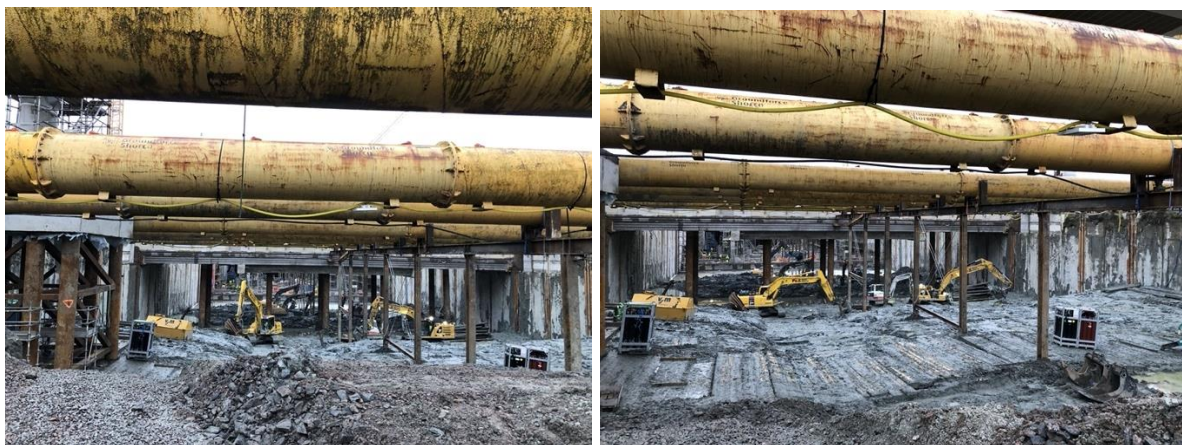
Vid stora schakter måste stödkonstruktionen antingen stegas med stämp eller med bakåtförankring (stag). Vilken typ som bör användas beror på förutsättningarna. Vid smalare schakter används vanligtvis stämp men även vid bredare schakter kan stämp användas. Om det exempelvis finns hinder i marken bakom stödkonstruktionen, vilket det oftast gör i urbana miljöer, används stämp med fördel. Att flytta på hindren kan vara svårt eller alltför kostsamt. Om marken har dålig bärighet, vilket lösa jordar liksom lera har, kan endast stag användas eftersom marken inte kommer bära som förankring. En fördel med att använda stämp är att de kan återanvändas vilket inte bakåtförankring kan. Nackdelen är att stag utgör ett fysiskt hinder i schaktet vilket påverkar produktionen negativt.

En vekare konstruktion, såsom stålsPonten, behöver stegas fler nivåer än en styv konstruktion för att inte deformeras för mycket. Om stålsPont används tillsammans med stämp kommer det att påverka produktionen negativt på grund av att stämpan skapar ett fysiskt hinder, se exempel i Figur 15 nedan. Här används stämp på flera nivåer för att den veka konstruktionen inte ska deformeras för mycket. Notera att stödväggen i figuren är av rörsPont och inte stålsPont, men principen med stämpan för den veka konstruktionen är densamma.



Figur 15 – Djupa schakter med vek stödväggskonstruktion kräver flera nivåer av stämp vilket skapar fysiska hinder

Jämför med Figur 16 där en stagnivå räcker. Här har slitsmur använts vilket är den styvaste konstruktionen.

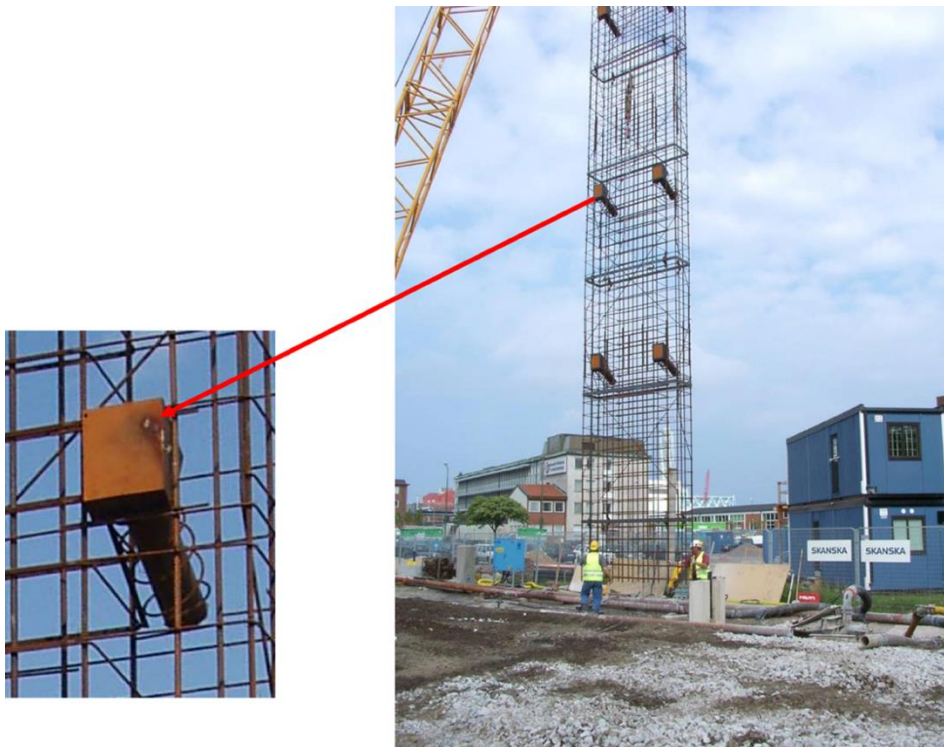


Figur 16 – Schakter med styv stödväggskonstruktion kräver färre stämpnivåer. Det leder till färre hinder och ökad framdrift

Till skillnad från stämp utgör bakåtförankring inget hinder vid schaktning. Däremot stör installationen av bakåtförankringen marken bakom stödväggen vilket kan skapa oönskade sättningar. I samband med bakåtförankring utförs stagen med injektering, vilket kan störa marken bakom stödväggen om de förankras i jord. Vid bakåtförankring i berg blir störningen mindre. Dock kan i båda fallen en urspolning av finmaterial ske vid vissa geologier vilket också kan ge upphov till sättningar och rörelser. Bakåtförankring skapar också hinder i de fall man ska schakta bakom stödväggen i senare skede. Ett vanligt krav är att förankringen ska demoleras efter avslutat arbete för att inte störa framtida arbeten. Åtminstone bör förankringsstagen spännas av, det vill säga avlastas, för att minska risken för skador i framtiden.

Om stödväggen ska bakåtförankras finns en fördel med slitsmursmetoden jämfört med stålspont och sekantpåleväggen. Vanligtvis utförs en viss del av bakåtförankringen under grundvattennivån, vilket betyder att förankringen görs under vattentryck. Förankringen installeras genomgående vilket betyder att förankringsstaget går genom hela väggens tjocklek. När förankringsstaget borrar igenom stödväggen punkteras stålsPonten och sekantpålarna när förankringen ska installeras. Vattentrycket gör då att grundvatten flödar in i schaktet genom hålet som borrar upp.

I slitsmurskonstruktionen kan förberedelser göras inför förankringen. I armeringskorgarna fästs en förankringsanordning, se Figur 17 nedan. Hela förankringsanordningen gjuts sedan in vilket skapar en vattentät anordning. Ena änden av anordningen, den som vetter in mot schaktet, göms i en svetsad och därmed tät box, se bilden till vänster i Figur 17 som pilen pekar på. När det är dags att förankra väggen tas det svetsade locket fram och öppnas genom att exempelvis borrar upp. I lugn och ro kan nu förankringen påbörjas utan att vattnet trycker in i arbetsområdet. Vidare behövs inget hammarband som vid stålsPont vilket också är en fördel.

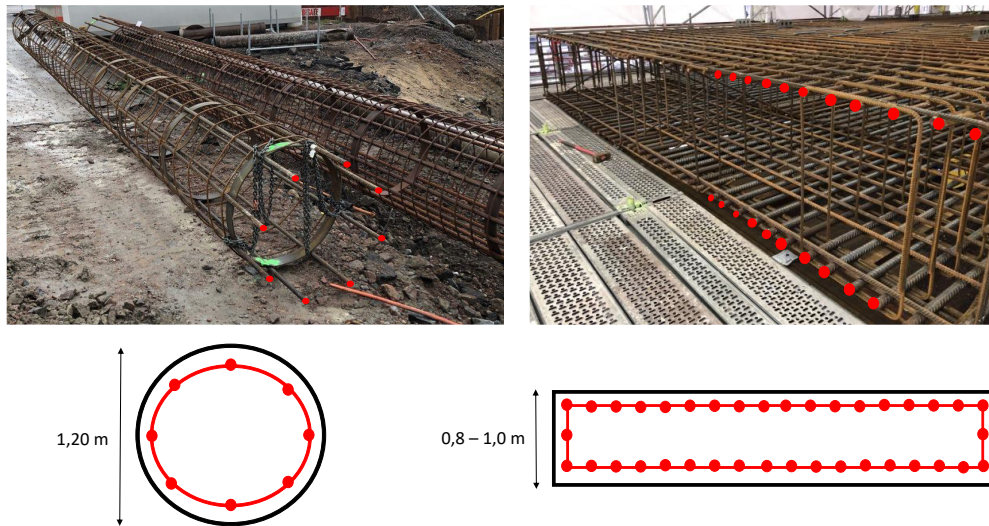


Figur 17 - Armeringskorg till slitsmur med förankringsanordning. Pilen pekar en förstoring av den täta boxen
(Fotografi: Christian Scholz u.å.)

2.4.3 Nyttjandegrad av armering i sekantpålevägg och slitsmur

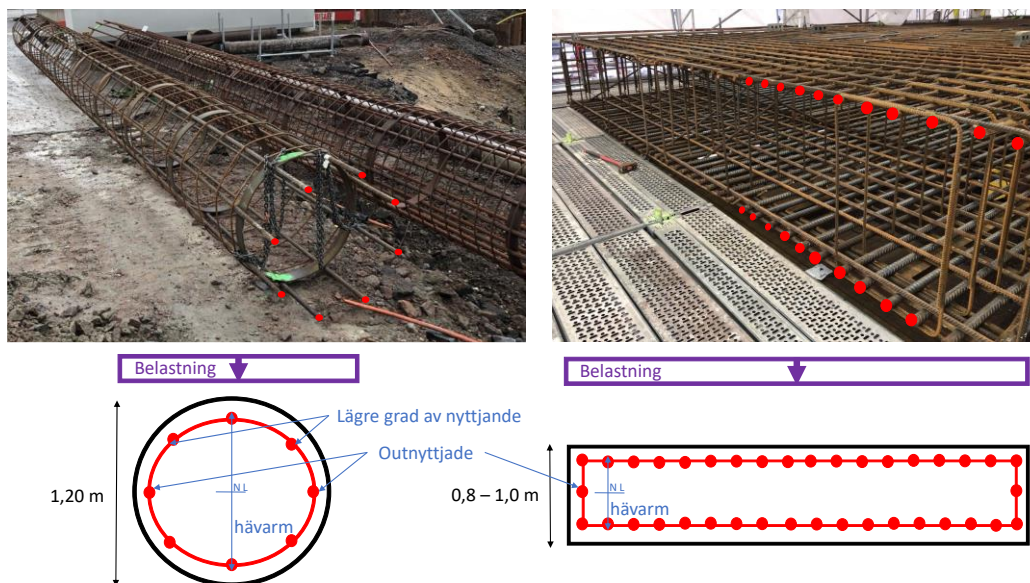
Sekantpålar och slitsmuren är på många sätt lika. De stora skillnaderna är i utförandet och att kapacitetsmöjligheten för slitsmuren är mycket större per kvadratmeter. Nedan jämförs de två metodernas nyttjandegrad av böjkapaciteten utifrån dess utformning.

I Figur 18 visas fotografier från armeringskorgarna som används på delprojekt *E02 Centralen*, Västlänken i Göteborg. Sekantpålekorgen till vänster och slitsmurskorgen till höger. Under fotografierna har en schematisk skiss gjorts över dess utformning.



Figur 18 - Fotografi och schematisk skiss över typiska armeringskorgar. T.v. sekantpålekorg. T.h. slitsmurskorg

Vad figuren ovanför visar är att man kan gå ner 20–40 cm i vägg tjocklek om slitsmur används och få samma kapacitet som sekantpåleväggen. Förklaringen till det finns i armeringen, närmare bestämt mängd och placeringen av armeringen, se Figur 19 nedan.

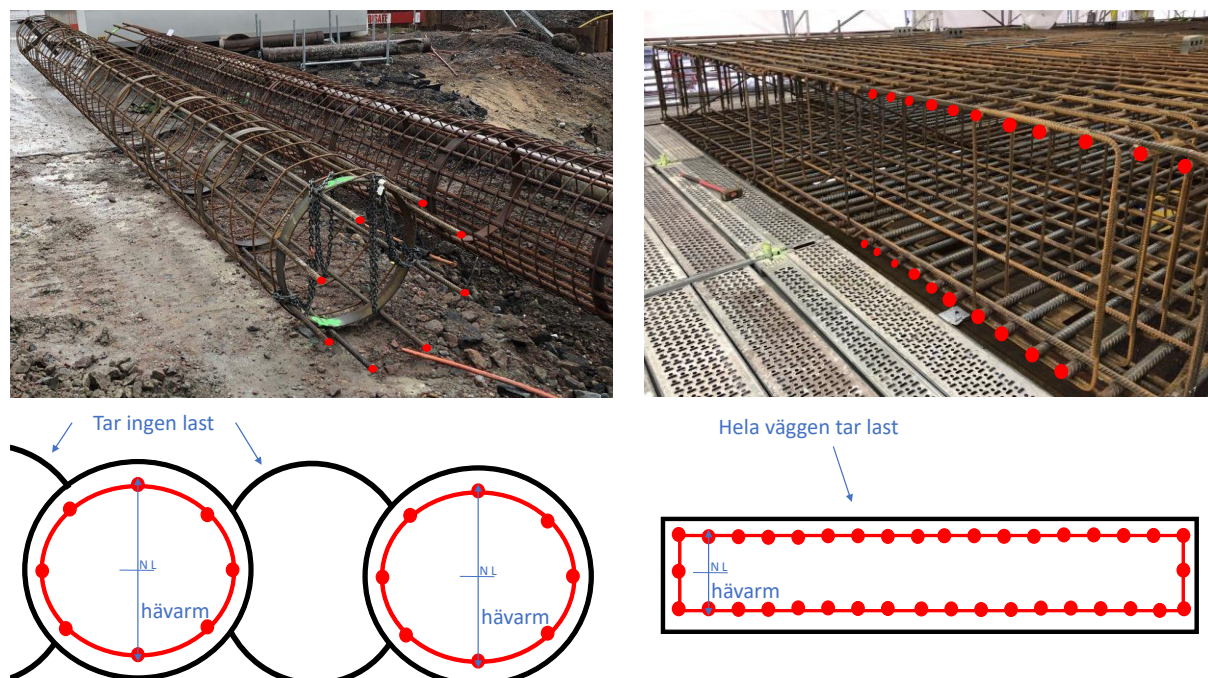


Figur 19 - Jämförelse mellan metodernas utnyttjande av armeringskapacitet. T.v. sekantpåle. T.h. slitsmur

När en konstruktion utsätts för belastning, deformeras konstruktionen och tryck- och dragkrafter uppstår. Tryck- och drag uppstår på var sin sida om konstruktionen. Det i sin tur betyder att det finns en punkt i konstruktionen som är neutral, det vill säga där varken tryck eller drag råder. Den punkten kallas för neutrala lagret och betecknas NL i Figur 19 ovan, och hittas längs mittlinjen av de båda konstruktionerna. Enligt samma princip ökar krafterna ju längre bort från neutrala lagret man kommer. Därmed återfinns den maximala tryckkraften och den maximala dragkraften längst bort från neutrala lagret. Avståndet från neutrala lagret till punkten man väljer att titta på kallas för hävarm. En konstruktions förmåga att motstå exempelvis böjning, är starkt korrelerad till hävarmen. Ju större hävarm desto större böjkapacitet.

I Figur 19 ovan tydliggörs skillnaderna i kapacitet mellan de två metoderna. Belastningen som skapar böjning i konstruktionerna är lilamarkerad. De blå markeringarna visar hävarmen och det neutrala lagret. De armeringsjärn som är mest utnyttjade är det översta och det understa, det vill säga två armeringsjärn totalt. Fyra armeringsjärn har kortare hävarm vilket betyder att de utnyttjas till lägre grad. Armeringsjärnen som befinner sig på neutrala lagret utnyttjas inte alls. Slitsmuren däremot har stående armeringsjärn som är endast är placerade där de gör störst nytta.

Samma exempel används nu för att visa kapaciteten för hela sekantpåleväggen, och inte bara för en påle. I de flesta fall är varannan påle oarmerad i en sekantpålevägg. Det är, som tidigare nämnt, för att förenkla utförandet eftersom man inte riskerar att borra sönder armeringen i den tidigare pålen. I de väggarna har varannan påle ingen kapacitet att utnyttjas eftersom de är oarmerade, se Figur 20.



Figur 20 - Jämförelse av samverkande sekantpålevägg (hård/mjuk) och slitsmurspanel

2.4.4 Summering

En summering ges i tabellform i Tabell 2.

Tabell 2 - Sammanfattning av informationen i kapitel 2 för lättare jämförelse av de tre metoderna

	Stålspont	Sekantpålevägg	Slitsmur
Styvhet	Vek	Styv	Styvast
Djup	Relativt ytligt	Upp till cirka 50 m	Upp till cirka 150 m
Omgivningspåverkan	Hög	Lägre	Lägst
Tillverkning intill befintliga byggnader	Krävs större avstånd	Krävs mindre avstånd	Minst 200 mm ifrån byggnad
Svenska entreprenörer	Ja	Nej	Nej
Upplagsyta och arbetsyta	Relativt liten	Relativt liten	Stor yta
Permanent bruk	Ej möjligt	Möjligt	Möjligt
Mängd stag och förankring	Flest	Färre	Ännu färre
Typiskt avstånd mellan fogar	15 cm	100 cm	3–9 m
Geologi	Löst material	Löst och hårt material	Löst och hårt material
Injektering	Krävs oftast	Krävs vanligtvis inte	Krävs vanligtvis inte
Masshantering (Se Figur 12 och 13)	Extra uttag av massor oftast	Inget extra uttag	Inget extra uttag

3 Slitsmurens historia

Deep foundation institute (DFI) och Malcolm Puller har båda nedtecknat slitsmursteknikens utveckling. Det italienska bolaget Icos tog under 40-talet fram slitsmurstekniken. Icos patenterade senare sin process (DFI u.å.). Slitsmurstekniken testades för första gången år 1948 innan den kom ut i produktion. Två år senare installerades den första slitsmuren med funktionen att avskärma en damm. Muren byggdes med bentonitstödsvätska för stabilisering av schaktet (Puller 2003).

Icos fortsatte att producera slitsmurar och i slutet av 50-talet användes tekniken i konstruktionssyfte då Milan Metro byggdes. Projektet innebar en omfattande cut-and-coverproduktion vilket ledde till att Icos utvecklade en teknik för top-down utförande, *The Milan Method* (Puller 2003).

År 1961 installerades den första slitsmuren med konstruktionsfunktion i Storbritannien. Det var i London, Hyde Park Corner, och Icos var utförarna (Puller 2003).

Runtom i Europa fortsatte Icos att kontrakteras för att installera slitsmurar i allt från marina miljöer till urbana. De användes till källare, tunnelbanor och för att avskärma vattenflöden (Puller 2003). Icos var under 50- till 70-talet världsledande på slitsmurstekniken (DFI u.å.).

Från mitten av 60-talet specialiserade sig och utvecklade flera firmor slitsmurstekniken. Det som Puller lyfter fram som främsta utvecklingsområdet var hur panelschakten skulle gå till. Icos hade först använt en tripod med linskopa. Sedan hade linskopa tillsammans med larvkran använts. Firmorna som under 60-talet började konkurrera, varav Icos är en av dem, räknas av Puller upp som:

- Icos, med marknad i Europa och USA
- Soletanche and Bachy, med marknad i Frankrike
- Trevisani och Rodio, med marknad i Italien
- Cementation, med marknad i Storbritannien

Samtliga firmor utvecklade ett eget system, men det kan trots antalet lösningar summeras till två huvudkategorier:

- Linskopa, med tripod eller kran
- Hydraulisk gripskopa

Systemen var vanliga in på 80-talet. Problemet med skopor är att endast löst material kan schaktas. Under 70-talet började ett system med rotation och slag användas för bergschakt.

Enligt Puller har utvecklingen av olika schaktsystem sedan dess drivits framåt av främst fyra skäl. Det första är av praktiska anledningar då man tidigare inte kunde installera slitsmuren i andra geologiska material än lös jord. Det andra är att med bättre utrustning kan paneldjupen ökas vilket återigen ställer krav på bättre utrustning. Det tredje är högre krav på den vertikala toleransen vilket i sig är en konsekvens av djupare schakter. Ju djupare schakt desto svårare att schakta rakt. Det fjärde skälet är ett övergripande skäl som ingår i de andra drivkrafterna, nämligen ekonomin. Att minimera maskintiden, speciellt när schaktaggregatet är nere i panelschaktet, är den främsta drivkraften att utveckla effektivare schaktsystem. Ju djupare

panelen är, desto längre tid tar schakten vilket påverkar helheten av installationen (Puller 2003). En tumregel enligt Scholz är att brytpunkten för när fräs är effektivare än gripskopa är när paneldjupet överstiger 40 m. Sedan beror självklart effektiviteten också på markförhållandena, men är panelen djupare så tar det helt enkelt för lång tid att köra gripskopan upp och ner för att tömma schaktmassorna (Christian Scholz, 26 april 2023).

I nutid finns och utförs slitsmurar över hela världen.

3.1 Slitsmurar i Sverige

En uppräknig av svenska projekt enligt kronologisk ordning (Muntlig kommunikation):

Avslutade

- Götatunneln, Göteborg (2001–2006)
- E101 Malmö central nedre, Malmö (2005–2008) – Se fallstudie i kapitel 5
- Filbornaverket (Kraftvärmeverk), Helsingborg (2010–2013)
- Nya triangeln (Galleria med parkeringsgarage), Malmö (2010–2011)

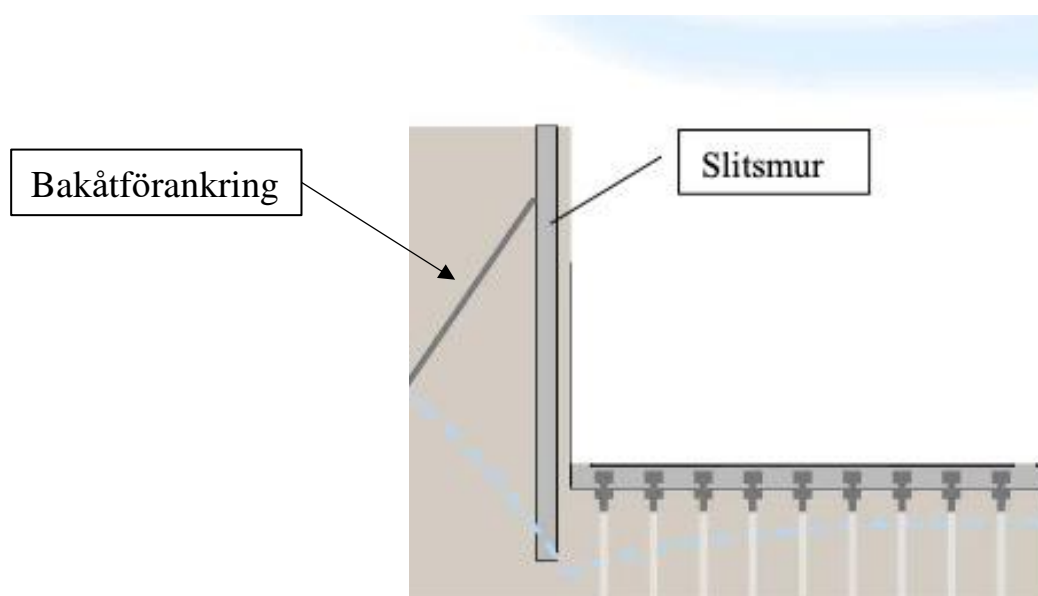
Pågående

- Fyrspåret Malmö-Lund (2017-
- Västlänken (2018-
 - Deletapp E02 Centralen
 - Deletapp E03 Kvarnberget
 - Deletapp E04 Haga
 - Deletapp E05 Korsvägen

4 Utförande av en slitsmur

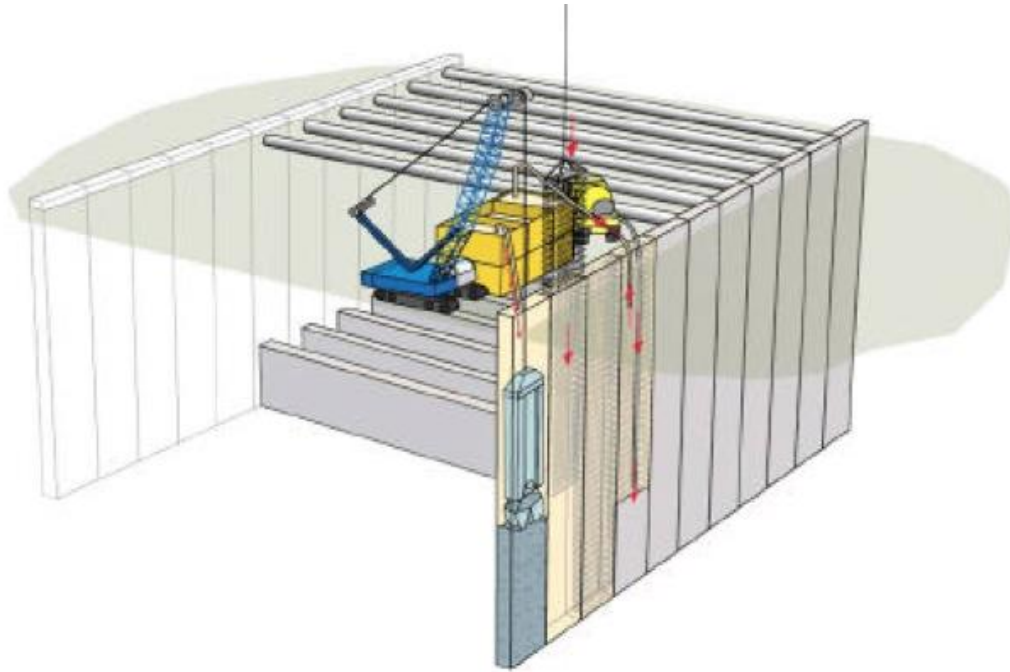
En slitsmur består som tidigare nämnt av separata paneler som binds samman. Den vanligaste utformningen är att panelerna samverkar genom vertikala fogar mellan panelerna samt en kontinuerligt gjuten balk på toppen. Ibland används kontinuerlig armering över panelerna. Det är dock svårt att utföra rent praktiskt. Därmed är det relativt ovanligt.

Vanligtvis tillverkas två parallellt längsgående slitsmurar. Slitsmurarna utförs till det djup som genererar tillräckligt med mothåll, det vill säga passivt jordtryck. Alltså installeras panelerna vanligtvis till fastare lager några meter under schaktbotten. Ovanför schaktbotten används antingen stämp eller bakåtförankring för att hålla slitsmurarna på plats. Vilket som används beror på förutsättningarna på plats, både omgivnings- och geotekniska förutsättningar (Christian Scholz, 9 maj 2023). Detta vanliga tillvägagångssätt exemplifieras i Figur 21 nedan och användes i entreprenad *E101 Malmö C nedre*, se kapitel 0.



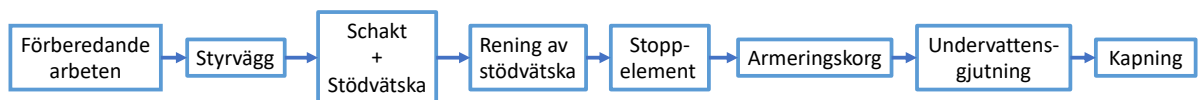
Figur 21 - Typiskt utförande av slitsmur, d.v.s. marken genererar passivt jordtryck under bottenplattan.
Redigerad figur (Möller & Blomqvist 2008, s. 26)

I de fall marken har dålig hållfasthet kan passivzonen förstärkas med tvärväggar. Tvärväggarna utformas med slitsmursteknik. Skillnaden mellan tvärväggarna och de längsgående slitsmurarna är att tvärväggarna oftast inte utförs till full höjd, utan till en nivå under schaktbotten. Alternativt kan de utföras med sämre betong i den övre delen för att lättare kunna schaktas bort. Vidare kan inte förankring användas när dåliga markförhållanden råder. I de fallen används stämp (Christian Scholz, 9 maj 2023). En principskiss från Götatunnelprojektet visas i Figur 22 (Alén, Lindvall, Johansson, Magnusson & Norén 2006). Marken i området har dålig bärighet vilket gjorde att både tvärväggar och stag användes. Figuren är från rapporten *Slitsmurar som permanenta konstruktioner* (Alén et al. 2006). Observera att grävmaskinerna står på markplan, det vill säga på den grågröna nivån i figuren.



Figur 22 - Principskiss av slitsmurskonstruktionen från Götatunneln. Slitsmurskonstruktionen utfördes med tvärväggar eftersom marken inte kan generera passivt jordtryck (Alén et al. 2006)

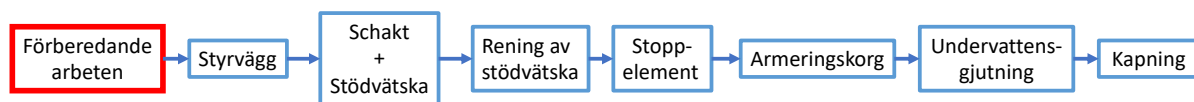
Utförandeprocessen av en panel presenteras överskådligt i Figur 23. Skissen är gjord utifrån den svenska standarden för slitsmursutförandet (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Varje del av processen som visas i figuren introduceras närmre i kommande avsnitt.



Figur 23 - Schematisk utförandeprocess av slitsmur uppdelat i 8 delprocesser för enklare överskådlighet

4.1 Förberedande arbeten

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 24 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 24 – Utförandet av en slitsmur, delprocess: förberedande arbeten inför slitsmursutförandet

För att panelerna ska bilda en samverkande och tät konstruktion med tillräckligt täcksikt, krävs ett gediget och noggrant förarbete. Om det inte görs leder det ofta till kostsamma och tidskrävande efterarbeten som inte har tagits höjd för i vare sig kalkyl eller tidplan.

Ett bra förarbete innebär först och främst ett stabilt och horisontellt arbetsområde. Även att förbereda marken och ta bort hinder och eventuell ledningsomläggning. Hela arbetsområdet bör klara tung transport av bland annat schaktmassor, leverans av armeringskorgar, betongbilar och övriga maskiner och kranar. Marken ska både klara den tunga trafiken ur bärighetssynpunkt och stabilitetssynpunkt utan märkbara markrörelser (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Om marken deformeras kommer det att få konsekvenser på de färdiga panelerna, mer om det i nästa avsnitt.

Utöver ett stabilt och horisontellt arbetsområde bör området även vara torrlagt. Om arbetsområdets marknivå inte ligger ovanför grundvattenytan krävs åtgärder för att skapa ett torrt arbetsområde (SS-EN 1538:2010+A1:2015).

En annan tidskrävande del av förarbetet är att ta bort eller minimera alla hinder och övriga störningar i marken, exempelvis ledningsomläggning eller borttagning av gamla pålar i marken. Se exempel på det sistnämnda i Figur 25. Figuren är ett foto taget under studiebesök 20 januari 2023 på projekt *E02 Centralen*, Västlänken.

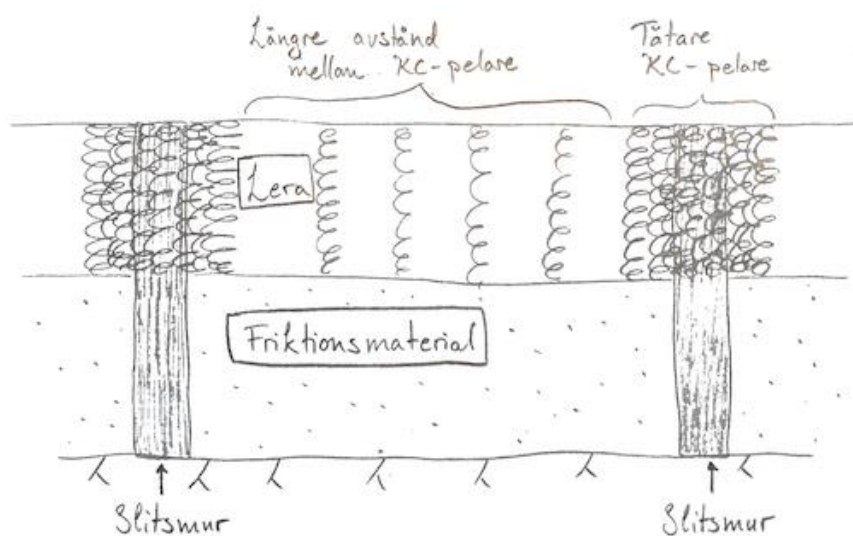


Figur 25 - Förberedande arbeten: borttagning av träpålar

Andra exempel på åtgärder kan vara att stoppa alternativt leda om läckage och andra vattenflöden i marken. Det är viktigt eftersom slitsmuren tillverkas direkt i marken.

Vattenflöden kan då påverka utförandet på flera negativa sätt. Ett exempel är att vattenflöden i marken kan erodera bort materialet i schaktväggarna (SS-EN 1538:2010+A1:2015).

Beroende på vilka markförhållanden som råder kan markberedning med fördel utföras. Det är dock inget krav i utförandekoden SS-EN 1538:2010+A1:2015. Kalkcementpelare är ett exempel som kan utföras om marken har låg hållfasthet. I delprojekten E03 *Kvarnberget* och E05 *Korsvägen*, Västlänken, utfördes kalkcementpelare (KC-pelare) före slitsmurstillverkningen för att öka markens möjlighet att ta upp passivjordtrycket och att få en bra bärighet. På Kvarnberget utfördes KC-pelarna som ett block, det vill säga sammanhängande. För Korsvägens del utfördes kalkpelarna i ett gitter, se skiss i Figur 26.



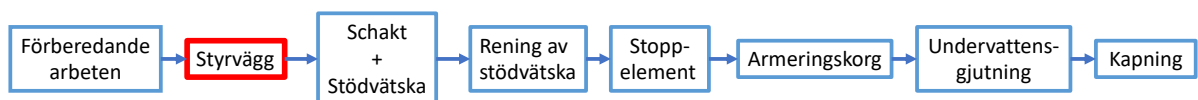
Figur 26 - Skiss över utförandet av kalkcementpelare (KC-pelare). Baserad på mötesskiss av Christian Scholz

De förberedande arbetena kan sammanfattas med fem punkter (SS-EN 1538:2010+A1:2015):

- 1) Stabil mark (tung trafik och utrustning)
- 2) Horisontell mark (säkerställa lodräta paneler som slutresultat)
- 3) Torrlagt arbetsområde
- 4) Inga hinder i marken
- 5) Inga vattenflöden i marken som kan påverka resultatet av panelerna

4.2 Styrvägg

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 27 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 27 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: styrväggens utförande och roll i slitsmursutförandet

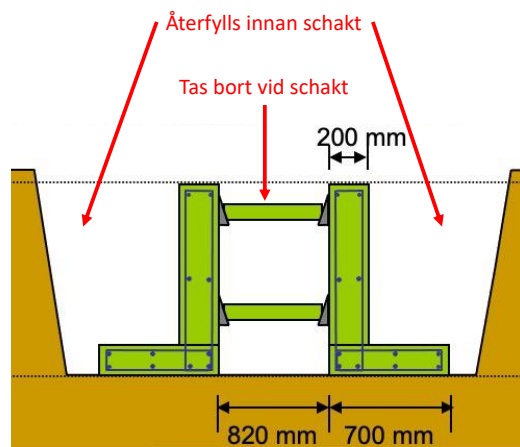
Den svenska benämningen på väggarna är olika i olika källor. Vanligtvis används namnen ledväggar, styrväggar, guide-väggar eller guide walls, där den sistnämnda är den engelska benämningen. I rapporten används ordet styrvägg.

Styrväggar har en huvudroll vid tillverkningen av slitsmurar. Principen med styrväggarna är att två parallella väggar gjuts längs positionen för slitsarna. Styrväggarna är ytligt grundlagda. I entreprenad *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, grundlades de på djupet 1,3–1,5 m under markytan (Möller & Blomqvist 2008). Figur 28 visar styrväggarna från *E101 Malmö C nedre*, projektet som studeras i kapitel 5. Figur 29 visar principiellt styrväggarna i tvärsektion.



Armering till fot

Figur 28 – Exempel på styrväggar. Styrväggarna är delvis prefabricerade (de två parallella och lodräta väggarna) och delvis platsgjutna (foten). Se armeringen markerad i figuren. Redigerat fotografi (Fotografi: Christian Scholz 2020)



Figur 29 – Principiell tvärsektion av styrväggarnas utförande. Redigerad figur (Scholz 2020)

Styrväggarna är temporära och används endast för tillverkning av slitsarna. Vanligaste materialvalet på styrväggarna är betong. Annat material får användas men då betong är ekonomiskt fördelaktigt exempelvis, är det oftast betong som används. Vanligast är platsgjutna väggar men även prefabricerade betongelement kan användas. I båda fallen ska väggarna bestå av kontinuerlig armering och gjutas samman för att samverka och på så sätt säkerställa god kvalitet på panelerna (Muntlig kommunikation). I projekt *E101 Malmö C nedre*, Figur 28, användes prefabricerade vertikala element. Det horisontella elementet, foten, gjöts på plats för att få samverkan. Armeringsjärnen till foten är markerad i figuren. Exempelbilder på platsgjutna styrväggar visas i Figur 30 och är tagna under studiebesök på *E02 Centralen*, Västlänken.



Figur 30 - Platsgjutna styrväggar. T.v. kontinuerlig horisontell armering. T.h. formning och färdiggjuten styrvägg

Normalt är väggarna utförda i form av ett L-stöd för att nyttja de återfyllda jordmassorna bakom stödet som mothåll på ett effektivt sätt. Väggar har vanligtvis ett djup på 0,7–1,5 m, beroende på markförhållandena. Avståndet mellan väggarna är något större (20–50 mm) än slitstjärnsnittet. Det innebär att schakttaggregatet har ca 20–50 mm spelrum till styrväggarna (Soilmec 2016b). Figur 31 visar gripskapan i styrväggen i projekt *E101 Malmö C nedre*. Här syns hur litet avståndet mellan gripskopa och styrvägg är.



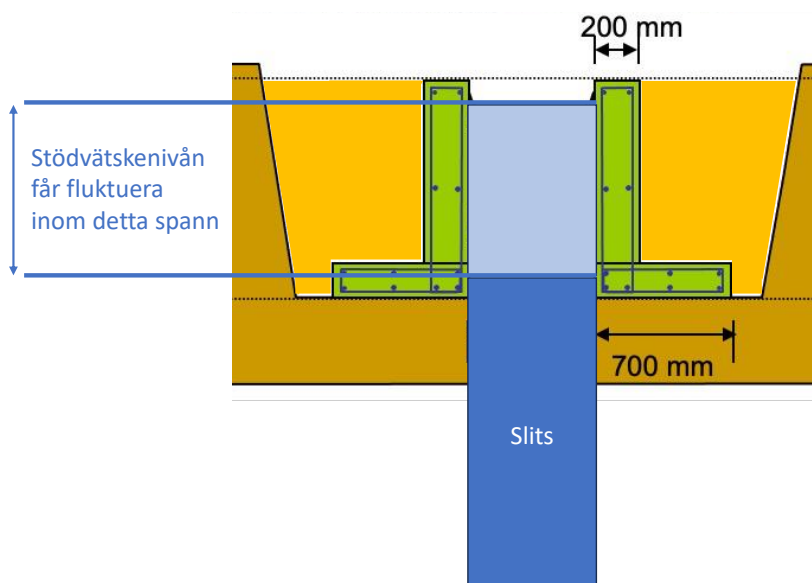
Figur 31 - Gripskopa under schaktning. Notera det tigha avståndet mellan styrväggarna och gripskapan. Redigerat fotografi (Fotografi: Per Lindh 2006)

Styrväggarna har flera uppgifter vilka kan summeras till två huvudkategorier: säkerställa slitsarnas position samt agera stöd för att motverka kollaps av schaktets övre del. Det gemensamma är att den slutgiltiga slitsmuren ska ha god kvalitet. Om inte god kvalitet uppnås kan det få ekonomiska, bärighetsmässiga och beständighetsmässiga konsekvenser samt påverka framtida underhållsarbete.

Styrväggarnas första uppgift går ut på att den slutgiltiga slitsmuren ska bli en rak och jämn mur där panelerna är i liv med varandra och samverkar. Med ett bra utfört förarbete, som sker innan styrväggarna konstrueras, är arbetsområdet stabilt och horisontellt utan risk för deformation. Det är viktigt då det utgör underbyggnaden för styrväggarna. Styrväggarna positioneras likt tidigare nämnt enligt slitsarnas placering. När det är dags för schakt guidas schakttaggregatet av styrväggarna så att slitsschaktet hamnar rätt (Soilmec 2016b). Om marken eller styrväggarna deformeras eller rör sig ur position blir konsekvensen att panelerna formas därefter. Skeva paneler kan bland annat äventyra murens täthet och täcksiktet.

Den andra uppgiften styrväggarna har är att hindra schaktet mot kollaps. Med styrvägg stabiliseras den övre, och mest känsliga, delen av schaktet. Den är känslig av flera anledningar. En anledning är att eftersom jordtrycket ökar med djupet är det i toppen som lägst. Djupare ner ökar även stödvätsketrycket vilket ökar stabiliteten. Därmed krävs konstruktivt stöd endast i toppen för att den lösare jorden inte ska falla in. (Muntlig kommunikation).

En annan anledning är att det säkrar upp sidorna mot kollaps på grund av fluktuerande stödvätskenivå. Stödvätskans understa nivå ska alltid ligga ovanför styrväggarnas underkant. Om vätskenivån ligger under styrväggarna riskeras jordmaterialet erodera bort. Det kan få flera konsekvenser varav en är att styrväggarnas grundläggning riskeras att undermineras. När schakttaggregatet tas upp och sänks ner i schakten som är full av stödvätska störs vätskan och vätskenivån fluktuerar. Därför är det viktigt att den fluktuerande stödvätskenivån hålls inom styrväggarnas höjd, se Figur 32 (SS-EN 1538:2010+A1:2015 och Soilmec 2016b).



Figur 32 – Schematisk tvärsnitt av styrväggarna med utmarkerad fluktueringsnivå. Redigerad figur (Scholz 2020)

Utöver stabilisering och erosionsskydd agerar även styrväggarna stöd för fogarna, armeringskorgarna och stödvätskeanordningen. I de fall då återanvändningsbara vertikala fogar används vid tillverkningen agerar styrväggarna stöd. När fogarna ska dras upp står styrväggarna emot reaktionskraften, det vill säga att styrväggarna används som mothåll (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Kraften kan jämföras med den sugkraft man kan känna håller emot när man ska dra upp en skyffel ur marken. Se exempel på upphängning av fog i Figur 33. Fotot är taget under studiebesök 20 juni 2023 på E02 Centralen, Västlänken.



Figur 33 – Fotografiet visar exempel på hur stoppelementen (vertikala fogarna) mellan panelerna installeras. Installation sker genom att stoppelementen hängs på styrväggarnas överkant

Armeringskorgarna hängs även dem upp i styrväggarna under gjutning och härdningstiden (Soilmec 2016b). Om djupa slitsar utförs krävs flera armeringskorgar som fästs i varandra. I de fallen bär styrväggarna upp den undre armeringskorgen under skarvning av nästa armeringskorg. Armeringskorgarna skarvas genom att de longitudinella armeringsjärnen från den undre och övre korgen överlappar varandra och kläms ihop med klämmor. Klämmorna tillsammans med friktionen håller ihop korgarna. Hur stort överlapp som krävs beror på fall till fall men kan exempelvis vara runt 1,5 m om diametern på armeringsjärnen är 28 mm (Christian Scholz, 31 juli 2023). Styrväggarna kan även användas för upphängning av stödvätskeanordningen vid inflöde och rening av stödvätska. Figur 34 visar ett foto taget under studiebesök den 2 februari 2023 på E05 Korsvägen, Västlänken. Upphängning av stödvätskeanordning visas i figuren.



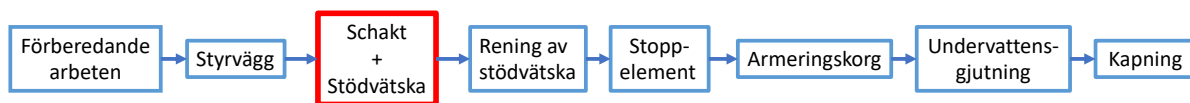
Figur 34 - Fotografiet visar exempel på hur stödvätskeanordningen installeras genom att anordningen hängs på styrväggarnas överkant

Styrväggarnas uppgift kan sammanfattas enligt nedan:

- 1) Styr schaktaggregatet
- 2) Säkerställer slitsarnas position lodrätt och i plan
- 3) Säkrar upp toppen av slitsschaktet mot kollaps från:
 - a. gripskopan eller fräsen
 - b. fluktuerande stödvätskenivå (erodering)
- 4) Agerar stöd vid:
 - a. upphängning av fogar samt står emot när fogarna dras upp
 - b. upphängning av armeringskorg under gjutning och härdning samt vid skarvning
 - c. stödvätskeanordningen

4.3 Schakt och stabilisering

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 35 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 35 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: schakt av slits och inpumpning av stabiliserande stödvätska

I normalfallet sker schakt av slits, utlastning av schaktmaterial och stabilisering av schaktväggarna samtidigt. Som tidigare nämnts i kapitel 2, är slitsmursmetoden den enda metod som använder stödvätska. Tack vare stödvätska kan varje slits göras längre, tjockare och djupare än utan stödvätska. Det är främst eftersom stödvätskan bibehåller tryck mot schaktväggarna som annars skulle kollapsa. Det finns dock specialtillfällen där torrschaktning används. Det finns även fall då stödvätskan endast innehåller vatten, det vill säga utan tillsatser, men det är ovanligt (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Vidare beskrivs därför endast utförandet i de fall då stödvätskan innehåller tillsatser eftersom det motsatta gäller i undantagsfall.

Vid tillverkning av en slits schaktas det geologiska materialet ut samtidigt som slitsen stabiliseras med stödvätska. Som nämdes i tidigare avsnitt om styrväggarna, krävs ständig kontroll och anpassning av stödvätskenivån under schaktningens gång. Det får varken vara för lite eller för mycket stödvätska i schaktet. Volymen stödvätska ska anpassas så att nivån ligger inom styrväggarnas höjd.

Figur 36 nedan visar två fotografier från studiebesök 20 juni 2023 på E02 Centralen, Västlänken. Fotografierna är från samma slitsschakt med en kort tids mellanrum samt från olika perspektiv. De två röda ringarna markerar vart stödvätska pumpas in i slitsschaktet. Samtidigt visas till höger hur gripskopan tömmer uppschaktat material som direkt transporteras bort.



Figur 36 – Fotografier av samma slitsschakt från två vyer. Schakt och pumpning av stödvätska in i schaktet sker samtidigt. De två röda ringarna markerar stödvätskans inflöde i slitsen. Notera gripskopans storlek och utseende

Beroende på de geologiska förutsättningarna kan i huvudsak två olika typer av schaktaggregat användas: gripskopa eller fräs i form av roterande kuttrar. I Figur 36 och 37 visas hur en typisk gripskopa ser ut. Vid schakt öppnas gripskopen maximalt och pressas ner i jorden med hjälp av dess egen tyngd. Gripskopen är försedd med tänder som lossgör jord och fyller skopan under stängning (Muntlig kommunikation).

Gripskopsaggregatet är försedd med längsgående väggar som styr gripskopen rätt vid schakt längs fogarna mellan slitsarna. Se Figur 37 nedan för de styrande väggarna.



Figur 37 - Gripskopsaggregatets styrning är markerad. Styrningen (likt vertikala väggar) styr skopan rätt i slitsschaktet

Om man inte kan gräva i det geologiska materialet används i stället fräsning. Se Figur 38 nedan för exempel på aggregatet som användes i *E101 Malmö C*, nedre.



Figur 38 – Fräsaggregat används vid hårdare geologiskt material. Notera fräshjulens storlek (Fotografi: Per Lindh 2006)

Tidigare nämndes att torrschakt i vissa fall kan utföras. När det kommer till fräsning måste stödvätska alltid användas för att kunna transportera bort det krossade materialet (Möller & Blomqvist 2008). Fräsen fungerar genom att de två fräshjulen roterar inåt, det vill säga vänster hjul roterar motsols medan höger roterar medsols. Materialet krossas av kuttrarna och puttas inåt mot centrum av aggregatet, se blå pil i Figur 39. Fräsaggregatet som är kopplat till en pump, pumpar upp det krossade materialet som sedan transporteras vidare till en separeringsanläggning.



Figur 39 - Fräshuvudena roterar enligt blå markering och det krossade materialet pumpas upp enligt pilens riktning. Redigerat fotografi (Fotografi: Per Lindh 2006)

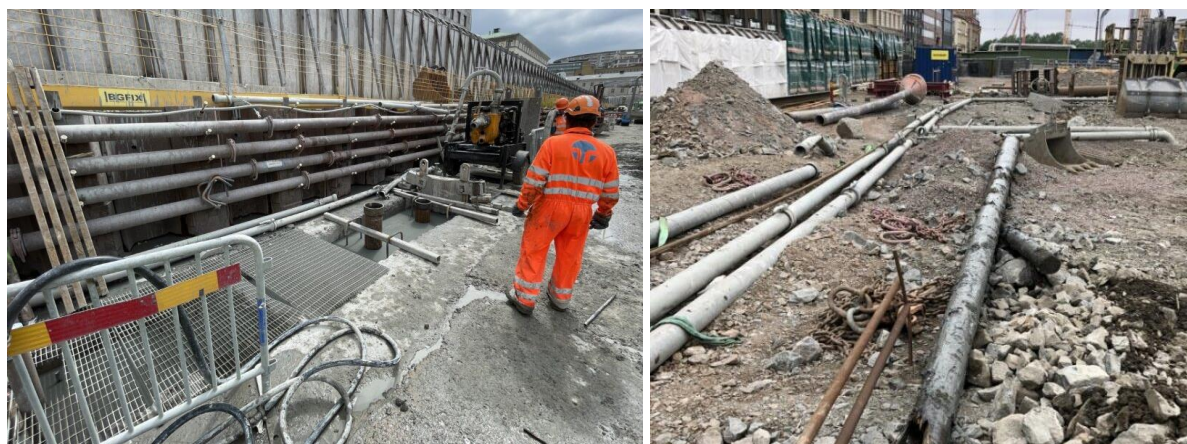
Sammanfattningsvis tillkommer en separeringsanläggning samt pumpar med hög kapacitet när man använder fräs i stället för gripskopa. Ytterligare krävs större volym stödvätska eftersom systemet och pumparna inte får gå torra. Pumpkapaciteten kan vara så stor som 500 kubikmeter per timme, vilket kräver större mängd stödvätska. Utöver extra pump och slangar, större etablering och mer logistik för att rena stödvätskan, så är fräsaggregatet 2–3 gånger så dyrt som gripskopsggregatet. Kuttrarna slits och behöver bytas ut. En generell uppskattning är enligt Scholz att 90 % av slitsmurarna i världen tillverkas med hjälp av gripskopa och endast 10 % med fräs (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Stödvätskan består vanligtvis av någon typ av bentonitlera men även polymerer kan användas (Alén et al. 2006). Olika typer av lera används för olika projekt eftersom förutsättningarna varierar från område till område. Det är väldigt viktigt att typen av lera som används i stödvätskan är vald utifrån rådande förhållanden. Ämnena i grundvattnet, det geologiska materialet och stödvätskans innehåll reagerar med varandra. Under själva utförandet ska även stödvätskan kontrolleras på plats så att den har rätt kvalitet. Med kvalitet avses bland annat att den ska vara av rätt densitet och viskositet (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Då syftet med arbetet är att förmedla den generella processen djupdyks det inte i de olika typerna av lera. Stödvätska innehållandes bentonitlera behandlas i denna rapport.

Lera används då det har en tätande förmåga. Dessutom kan lerblandat vatten jämfört med vanligt vatten motstå skjuvning. Utöver den tätande förmågan och skjuvmotståndet har lerblandat vatten en högre densitet än vanligt vatten. Densiteten på stödvätskan bör ligga mellan 1,02–1,04 kg/m³, det vill säga aningen högre än vanligt vatten (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). För jämförelse kan nämnas att i erfarenhetsåterföringen för E101 Malmö C nedre, Citytunneln i Malmö, nämns att i de fall stödvätskan uppgick till över 1,1 kg/m³ gick den inte längre att hantera och därmed inte att använda (Möller & Blomqvist 2008).

Vad som är viktigt redan före arbetena påbörjas är att ha en plan för vart och hur stödvätskan ska transporteras till och från samtliga slitsar. Det är viktigt både ur kvalitets- och produktionssynpunkt att tur- och retur pumpningen av stödvätskan fungerar på ett bra sätt. På *E03 Kvarnberget*, Västlänken, har stödvätskeledningarna hängts upp på spontväggarna, se till vänster i Figur 40. På *E02 Centralen*, Västlänken, ligger de längsgående ovan mark medan de tvärgående är nergrävda, se till höger i Figur 40.



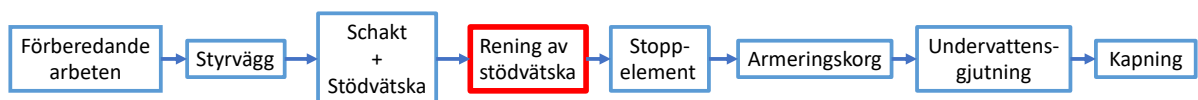
Figur 40 – Två exempel på hantering av stödvätskeledningar för att möjliggöra till- och frånflöden av stödvätska till slitsen. T.v. ledningarna är upphängda längs sponten (Fotografi: Per Lindh 2006). T.h. ledningarna är markgående

Vid förlust av stödvätska, det vill säga att den faktiska volymen inte stämmer överens med den teoretiska slitsvolymen, ska särskilda åtgärder vidtas. Utförandekoden nämner 3 delar (SS-EN 1538:2010+A1:2015):

- Om stödvätska går förlorad ska man fylla på med lika mycket som har försvunnit, det vill säga till en nivå inom styrväggarnas höjd. Om nivån är för låg kan schaktet undermineras. Eventuellt kan tätningsmaterial adderas till stödvätskan för att minska risken att vätskan försvinner igen
- Om det är omöjligt eller ineffektivt att fylla på med mer stödvätska, är det mer lämpligt att återfylla schaktet med lättschaktat material. Efter det får man utreda vart vätskan försvinner.
- Om det från start finns extra stor risk för stödvätskeförlust, exempelvis på grund av permeabelt jordskikt eller hålrum av olika slag, bör något av följande alltid finnas nära till hands för att korta tiden för ett öppet schakt utan stabilisering: tätningsmaterial, extra stödvätska eller lättschaktat fyllningsmaterial.

4.4 Rengöring av slitsen och dess stödvätska

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 41 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 41 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: rengöring av stödvätskan samt slitsväggarna och slitsbotten

När slitsen är färdigschaktad rengörs slitsen, befintliga stoppelement och stödvätskan. Botten av slitsen rengörs för att få en rektangulär och jämn form. Om ett stoppelement ska installeras görs det efter att stödvätskan har renats. Anledningen till att stoppelementet placeras efter rengjord stödvätska är för att minska risken för kontaminering längs fogen. Om det finns en eller flera befintliga stoppelement från tidigare gjuten panel, rengörs fogen så att betongen får god vidhäftning. Om fogarna inte rengörs ordentligt kan kvarsittandelera ha fastnat i fogen. Med tiden kan finpartiklarna urlakas och sprickor bildas (Muntlig kommunikation). Figur 42 nedan visar exempel på rengöringsaggregat. Kvastarna längs sidan på aggregatet rengör stoppelementen. Spetsarna under aggregatet rengör botten av slitsen.



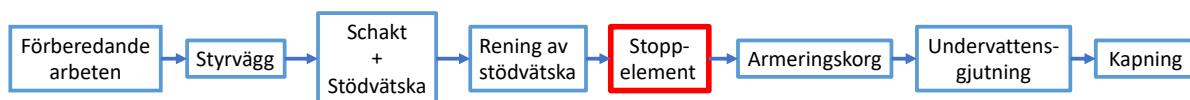
Figur 42 – Exempel på rengöringsaggregat för mekanisk rengöring av slitsens väggar (de längsgående borstarna) och slitsbotten (den taggformade botten). Aggregatet användes på E101 Malmö C nedre (Fotografi: Per Lindh 2006)

Under schaktningen blandas stödvätskan med det geologiska materialet och blir därmed kontaminerad och får förändrade egenskaper vilket kan försvåra användningen av schaktmassorna. Under gjutningen är det viktigt att stödvätskan har rätt kvalitet. Det är också viktigt att stoppelementen och armeringskorgarna inte kontamineras, det vill säga får en beläggning av smutsig stödvätska. När slitsen är färdigschaktad byts därför den befintliga stödvätskan ut mot rengjord eller ny stödvätska. Utbytet pågår tills att slitsens stödvätska uppnår rätt kvalitet. Utförandekoden beskriver vilka värden som ska uppfyllas för att få rätt kvalitet. Med rätt kvalitet menas bland annat rätt densitet, viskositet och låga halter geologiskt material (SS-EN 1538:2010+A1:2015).

European Federation of Foundation Contractors (EFFC) och Deep Foundation Institute (DFI) skrev 2018 en guide till gjutning med gjutrör vid djupa grundläggningar. Tiden ska hållas så kort som möjligt från att stödvätskan har bytts ut till att man börjar gjuta. Ju längre tid som schaktet står öppet desto större försämring av stödvätskans kvalitet (EFFC & DFI 2018).

4.5 Stoppelement

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 43 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 43 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: placering av stoppelement (vertikala fogar mellan panelerna) i slitsen

Vanligast är som tidigare nämnts att slitsarna gjuts var för sig med egna armeringskorgar, det vill säga utan kontinuerlig armering mellan panelerna. Det är främst för att förenkla produktions skedet. I stället används stoppelement med någon typ av förtagning mellan slitsarnas vertikala ändar. Stoppelementen möjliggör vattentäthet, vidhäftning för samverkan och upptagning av reaktionskrafter mellan panelerna.

Stoppelementen kan:

- utformas på många olika sätt
- vara av stål eller betong (prefabricerad eller platsgjuten)
- utföras med eller utan fogband
- utföras som kvarsittande eller som uppdragbara
- utfördes på många olika sätt

Vilken variant som används beror på parametrar såsom det ekonomiska- och leveransmässiga läget, vad entreprenören föredrar att arbeta med och vilken täthet slitsmuren ska uppnå (Muntlig kommunikation).

För vattentäthet beror kraven delvis på om en innervägg som tar vattentrycket ska gjas eller inte. Om en innervägg gjuts kan en mindre tät fog utföras. I det fallet kan ett spontformat stoppelement av stål användas. Om krav på hög täthet finns bör fogband användas. Delvis beror kraven på vattentäthet på omgivningen. Om området är känsligt för sättningar eller att grundvattenytan inte får sänkas är det viktigare att slitsmuren är tät. Om tillräcklig täthet inte kan uppnås kan injektering längs fogarna behövas.

Det är viktigt att stoppelementen har tillräcklig hållfasthet om de är kvarsittande så att de klarar belastningen som uppstår. Lika viktigt är det att slitsarnas ändar har tillräcklig hållfasthet om stoppelementen endast används som form, det vill säga är uppdragbara.

I *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, användes kvarsittande prefabricerade betongelement med fogband, vilka visas i Figur 44. I projektet användes endast slitsmuren för temporärt skede. Alltså krävdes en vattentät vägg under anläggningstiden men inte under driftskedet (Muntlig kommunikation).



Figur 44 – Stoppelement av betong med fogband för vattentätet (Fotografi: Per Lindh 2006)

Uppdragbara stoppelement är ofta spontformade och av stål. De dras upp när den gjutna slitsen har uppnått tillräcklig hållfasthet (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Användning av temporära stoppelement innebär inte att slitsmuren är temporär. Det innebär bara att slitsens ände i sig antar stoppelementets form och därmed samverkar med intilliggande slits. Se exempel i Figur 45. Fotografierna är från studiebesök den 20 juni 2023 på *E02 Centralen*, Västlänken. Förtagningen på stoppelementen är runt 10 cm djup.



Figur 45 – Exempel på ett stoppelement av stål.
T.v. helhetsbild av stoppelementet. T.h. Närbild på förtagning. Förtagningen är 10 cm djup

I det fall då tvärväggar ingår i den samverkande slitsmurskonstruktionen kan delvis permanent och delvis temporära stoppelement användas. Det är fallet för *E02 Centralen*, Västlänken. Tillvägagångssättet förklarades av Colin Qvarnström, biträdande blockchef för slitsmursarbeten, NCC. Då tvärväggens slits har full höjd krävs stoppelement hela vägen upp till styrväggarna, trots att gjutning endast sker till en viss höjd från botten. Underst, upp till tvärväggarnas höjd, används permanenta stoppelement formade som en stålspont. De är

permanenta då det är praktiskt svårt att dra upp dem efter gjutning. Ovanför tvärväggens höjd används temporära stoppelement. För att hålla samman det temporära och permanenta stoppelementet i första skedet och sedan lossa dem i nästa, används en låsmekanism. Låsningen består av ett stålrör med vinkel längst ner som genom vridning antingen låser eller låser upp stoppelementen. Det finns framför allt två fördelar med att utföra tvärväggarna med denna typ av tvådelade stoppelement jämfört med stoppelement med full längd. Dels krävs inget efterarbete i form av kapning av stoppelementet till rätt nivå, dels genererar det mindre materialåtgång eftersom den övre delen inte skrotas utan återanvänds (Colin Qvarnström, 20 juni 2023). Se Figur 46 för princip. Här agerar tumstocken låsningsmekanismen, det vill säga stålrör med vinkel längst ner.

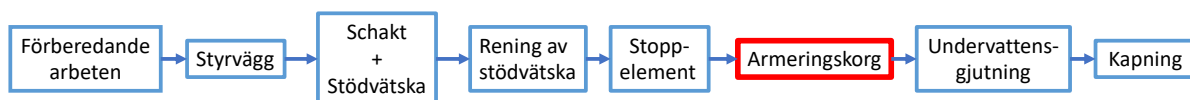


Figur 46 - Låsmekanism mellan temporärt och permanent stoppelement i stål. Tumstocken med vinkel agerar låsning

Fler varianter av stoppelement förekommer, men gås inte vidare in på. Syftet med arbetet är att visa på den principiella funktionen av stoppelementen snarare än vilka typer som finns.

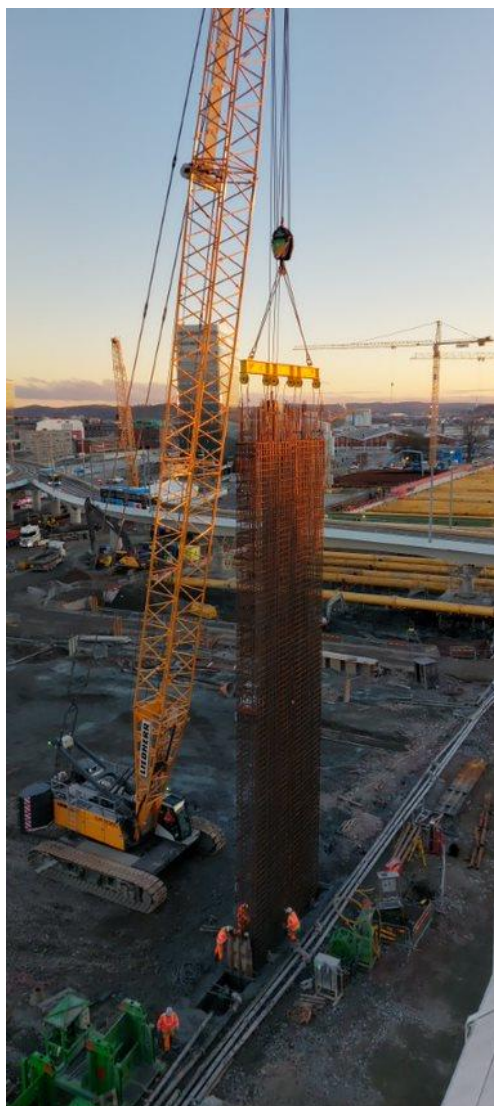
4.6 Armeringskorg

Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 47 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 47 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: Placering av armeringskorg i slitsen inför gjutning

Armeringen är det sista som placeras i slitsen före gjutning. Armeringskorgarna är anpassade till varje projekt vilket betyder att de har olika utformning och storlek. Exempelvis kan armeringskorgen nedan, Figur 48 från *E02 Centralen*, Västlänken, och armeringskorgen i Figur 17 jämföras. Armeringskorgarna är utformade på olika sätt eftersom slitsmurarna är utformade på olika sätt. Armeringskorgen i Figur 17 är en typisk slitsmurskorg och väger som mest 10 ton. Armeringskorgen nedan är stor och tung med en vikt på omkring 30 ton. Anledningen till den stora armeringsmängden är att slitsmuren på *E02 Centralen*, Västlänken, utformas med tvärväggar eftersom marken har låg hållfasthet. Detta ger stora krafter. Fotografiet nedan är taget av Malin Odepark Larsson, kommunikatör på NCC.



Figur 48 - Exempel på armeringskorg, helhetsbild av lyft och placering i slits. (Fotografi: Malin Odepark Larsson 2022)

På grund av armeringskorgarnas storlek krävs noggrann planering för hur de ska hanteras. I Sverige är det vanligt att armeringskorgarna svetsas på annan ort för att sedan transporteras till arbetsplatsen. Storleken på korgarna begränsas i detta skede av trafikregler och transportkapacitet. Vål på plats finns vanligtvis en armeringsstation där korgarna anpassas genom att man svetsar på ytterligare armering och övriga tillägg samt fäster distanser (Muntlig kommunikation). Exempel syns i Figur 49, 50 och 51. Det översta fotografiet, Figur 49, är taget under studiebesök den 20 januari 2023 på *E02 Centralen*, Västlänken, och visar samma typ av armeringskorg som visas i Figur 48. Figur 50 visar distanserna som användes på samma projekt. Runt 120 mm täcksikt. Figur 51 visar upphängningsarmeringen vilka armeringskorgen hängs upp i styrväggen med. Fotografiet är taget under studiebesök den 2 februari 2023 på *E05 Korsvägen*, Västlänken.



Figur 49 - Armeringskorg som förbereds på armeringsstationen. Notera dess stora storlek



Figur 50 – Distans (ca. 120 mm) mellan armeringskorg och slitsvägg



Figur 51 – Armeringskorgen hängs upp i styrväggarna genom de uppstickande U-formade armeringsjärnen

De två fotografierna nedan visar en närbild på en armeringskorg. Fotografierna är tagna under studiebesök den 2 februari 2023 på E05 Korsvägen, Västlänken. Till vänster visas hur en typisk slitsmurskorg är utformad. Den röda cirkeln markerar vilket järn som visas närmre till höger. Storleken på den stående armeringen är 40 mm i diameter.



Figur 52 – T.v. Dubbla lager av longitudinell armering T.h. närbild på ett av de longitudinella armeringsjärnen. Cirka 40 mm

När armeringskorgen lyfts på plats i slitsen hängs korgen upp i styrväggarna med hjälp av upphängningsarmeringen som exemplifieras i Figur 51. Korgarna ska inte vila på botten utan ska hänga minst 200 mm ovanför schaktbotten (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Det krävs god planering för att lyfta armeringskorgarna då de är stora och tunga. Risken är att korgen böjer sig om den lyfts fel. Ett vanligt lyft sker genom att kranen, som har två spel, lyfter den horisontellt belägna armeringskorgen. Korgen lyfts rakt upp så att den fortfarande är horisontell. Sedan lyfter man bara i ett spel tills armeringskorgen hänger lodrätt, utan att ha böjt sig under lyftet. Överst hänger korgen i en balk för att fördela lasten jämt, se Figur 48. Sedan sänks armeringskorgen ner i slitsen och fästs i styrväggarna (Muntlig kommunikation).

Figur 53 visar exempel på en böjd armeringskorg som därmed är obrukbar. Fotografiet är taget av Christian Scholz på ett projekt i Egypten. En armeringskorg kan böjas vid lyftet av i huvudsak två anledningar: antingen lyfts korgen fel eller är armeringskorgen fel- eller underdimensionerad. Båda anledningarna kan leda till obrukbara armeringskorgar som behöver skrotas.

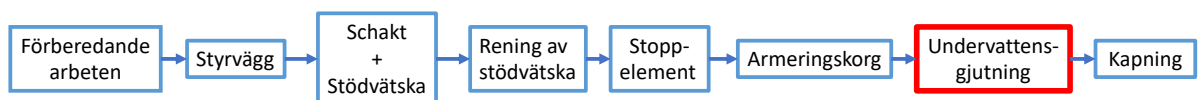


Figur 53 - Förstörd armeringskorg från projekt i Egypten (Fotografi: Christian Scholz u.å.)

I skedet när armeringskorgen ska placeras i slitsen begränsas dess längd av hanteringen vid lyftet. Vid väldigt djupa slitsmurar blir en armeringskorg för stor och tung att hantera. I stället används flera korgar som skarvas ihop på längden. Monteringen av dem sker i samband med att de sänks ner i slitsen. Vid skarvade armeringskorgar sätts den första på plats och hängs upp i styrväggen. Sedan skarvas nästa armeringskorg på innan de båda sänks ner till rätt djup (Christian Scholz, 31 juli 2023).

4.7 Undervattensgjutning

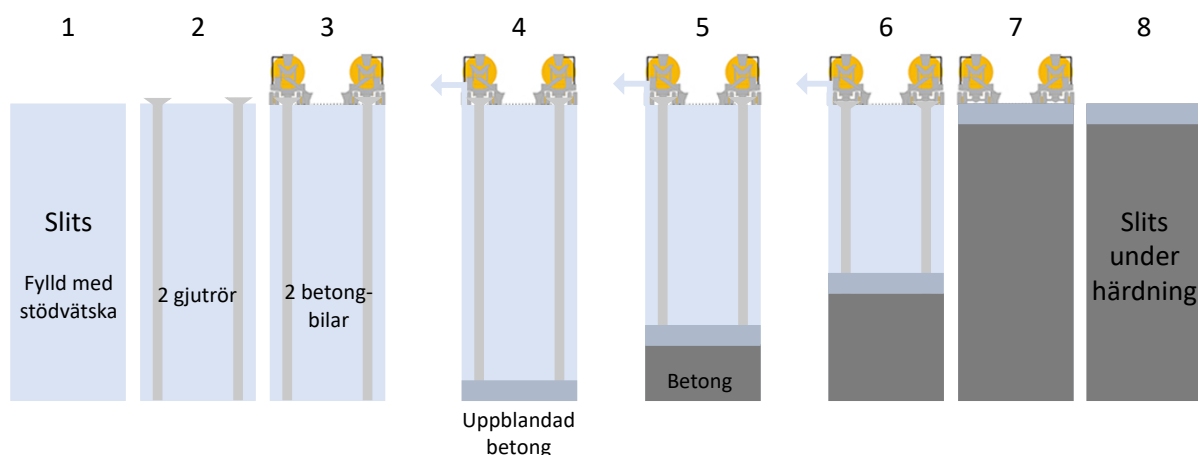
Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 54 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 54 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: gjutning av slitsen

Gjutningen är både ett kvalitets- och tidsmässigt kritiskt steg i slitsmurstillverkningen. Målet är en homogen betongkonstruktion. Med andra ord en konstruktion utan: inblandning av lera, hålrum, bristande täckskikt och separerad betong, bland annat. Likt alla betongkonstruktioner spelar gjuttiden en viktig roll eftersom betongen inte får börja styvna förrän hela konstruktionen är gjuten. Alltså, när man påbörjar gjutningen av en slits måste den fullföljas.

Gjutningen börjar i botten på slitsen under stödvätskan. Därmed är gjutningen en undervattensgjutning. Gjutningen fortsätter sedan i jämn takt uppåt till toppen, se steg 4–7 i Figur 55. Att gjutningen sker från botten till toppen är eftersom det är det enda sättet som är möjligt. Betongen som har markant högre densitet än stödvätskan kommer alltid att hållas under stödvätskenivån. Därmed blandas inte stödvätska med betongen. En självkompakterande betong används, det vill säga att den inte kräver vibration (Muntlig kommunikation).

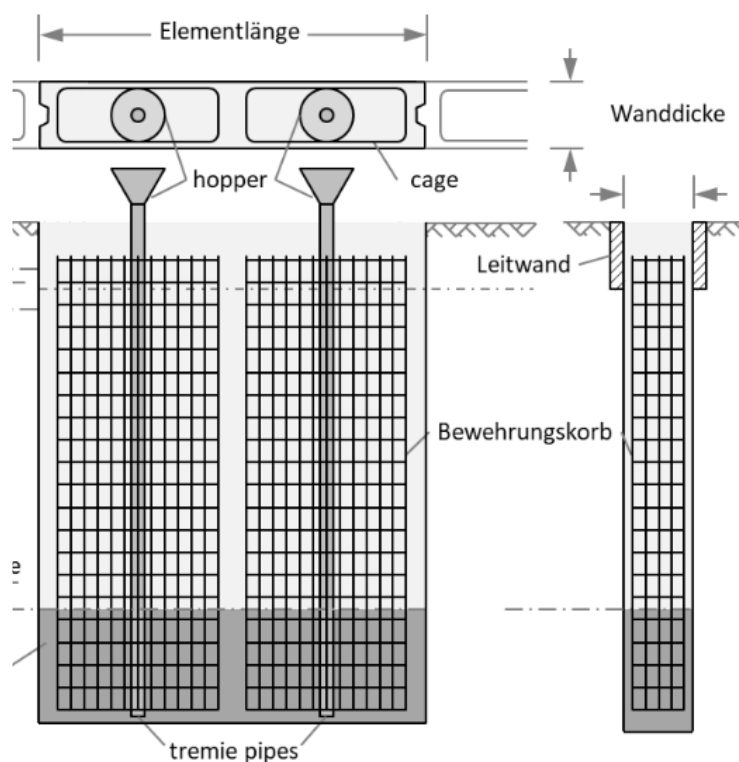


Figur 55 – Schematiskt förlopp över gjutningen av ett slitschakt. Steg 1 markerar en slits som är redo för gjutning (d.v.s. har genomgått de 6 första delprocesserna i Figur 54). Steg 2–8 markerar själva gjutförloppets delprocesser.

Figur 55 visar en skiss över gjutningsförloppet. I slitsen som är full med stödvätska sänks vattentäta rör, så kallade gjutrör, ner till botten och höjs sedan cirka 10 cm. Se steg 1 och 2 i Figur 55. Hur många gjutrör som bör användas beror på betongens möjlighet till utbredning i slitsen. Enligt den svenska standarden för utförandet av slitsmurar är det främst längden på slitsen och antalet armeringskorgar som avgör antalet gjutrör. Det bör antas att den horisontella utbredningen av betongen från gjutröret är mindre än 3 m, det vill säga att om slitslängden är maximalt 6 m kan ett gjutrör användas (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Enligt den österrikiska riktlinjen för slitsmurar kan den maximala utbredningen antas vara 2,5 m, vilket innebär maximal slitslängd på 5 m (Deix 2019). Alltså, en skillnad på 1 m mellan den svenska standarden och den österrikiska riktlinjen. Då man eftersträvar långa slitsar för att öka produktiviteten, krävs oftast flera gjutrör. Vanligt är att två gjutrör används vilket också är fallet i Figur 55. Utöver längden på slitsen brukar fler armeringskorgar innebära att fler gjutrör

behöver användas, eftersom armeringen stör betongflödet. Enligt den svenska standarden bör minst lika många gjutrör som armeringskorgar användas för att få fullgod utbredning (SS-EN 1538:2010+A1:2015).

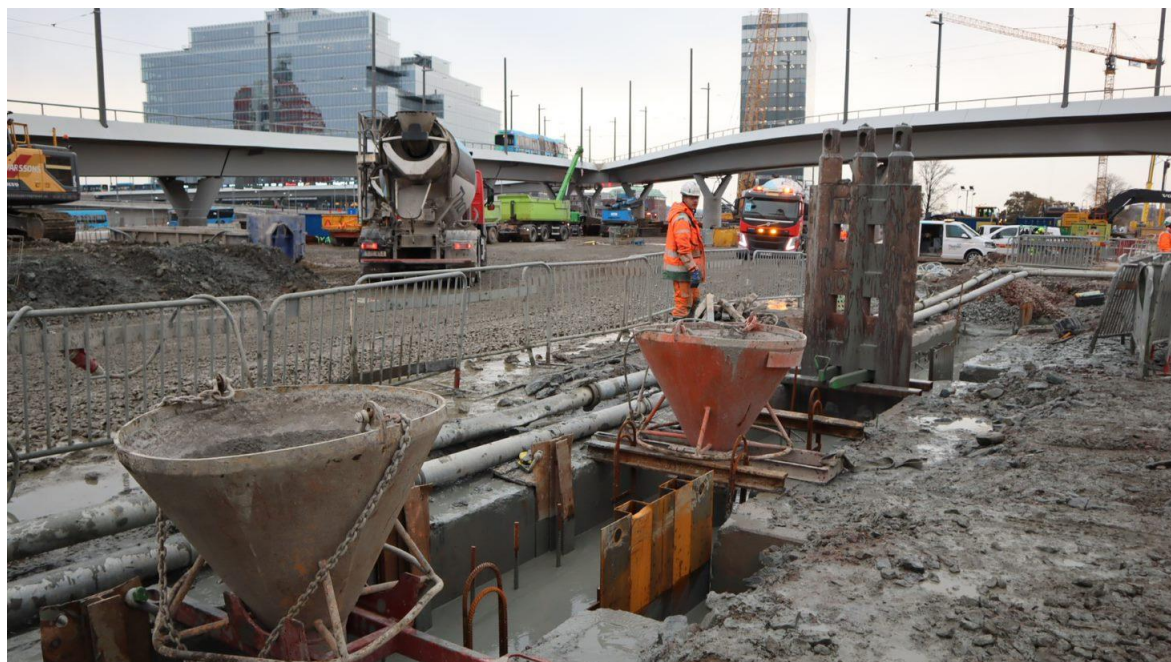
Figur 56 visar schematisk placering av gjutrören. I figuren kan man även se två trattar som utgör toppen av gjutrören (engelska: tremie pipe). I dessa hålls betongen i.



Figur 56 - Schematisk placering av gjutrören i en slits. I exemplet har slitsen två armeringskorgar, men principen är densamma för en slits med en stor armeringskorg (Scholz u.å.)

Anledningen till att man använder gjutrör är i huvudsak av två anledningar. Den första är för att minimera risken att betongen kontamineras av stödvätskan. Den andra är för att minimera risken att betongen separerar. Användningen av gjutrör är branschstandard men inget krav utan andra metoder som uppfyller samma funktion får användas (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Då gjutrör är vanligast är det den metoden som förklaras i rapporten.

Nedan, i Figur 57, visas ett fotografi taget av Malin Odepark Larsson på projekt E02 Centralen, Västlänken. Fotografiet är taget inför gjutning och visar hur det kan se ut i praktiken.



Figur 57 - Fotografi taget precis före gjutning av en slits (Fotografi: Malin Odepark Larsson 2022)

För att undvika att stödvätskan och betongen blandas används ett tätslutande lock eller stopp i gjutrören. På E02 Centralen, Västlänken, användes en boll i röret för att sluta tätt. När sedan gjutningen börjar pressar den tyngre betongen ut bollen ur röret. Bollen som är lättare än stödvätskan flyter upp till ytan, se röda cirkelmarkeringar i Figur 58.



Figur 58 - T.v. pågående gjutning av tvärvägg, boll markerad i vänster hörn. T.h. färdigdjuten panel, boll markerad i mitten

Den första betongen som flödar ut i slitsen kommer trots boll eller annat stopp att blandas upp med stödvätskan, se steg 4 i Figur 55. Därefter hålls den nya betongen ren från stödvätska eftersom den pumpas ut under den uppblandade betongen, steg 5 i Figur 55. I takt med att betongnivån höjs så lyfts gjutrören etappvis under kontrollerade former, steg 6 och 7 i figur 55.

Enligt den svenska standarden för slitsmursutförandet ska åtminstone 6 m betong finnas i slitsen innan första höjningen görs. Med kontrollerade former menas att gjutrörens underkant alltid ska hållas i den färskbetongen för att inte den nya betongen ska mixas. Minst 3 m under den färskbetongens överyta bör gjutrörets ände hållas. I toppen av slitsen kan avståndet behöva minskas ytterligare av praktiska skäl (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Den första oundvikligt uppblandade betongen kommer alltid att hamna överst i slitsen. Det är en avledningarna till att man alltid gjuter slitsen högre än den faktiskt ska vara. Efter härdning kapas den uppblandade betongen bort vilket beskrivs i nästa avsnitt.

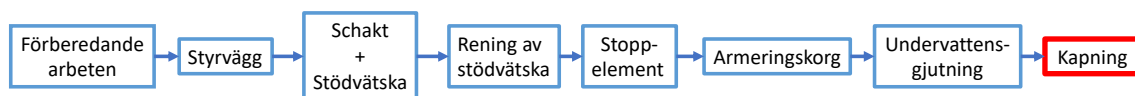
Samtidigt som betong pumpas in i slitsen pumpas stödvätska ut ur slitsen, steg 4–6 i Figur 55. Stödvätskan pumpas vidare till reningsanläggningen för behandling så att den kan återanvändas i nästa slitsschakt.

Inför gjutningen krävs god planering och kommunikation mellan betongstationen och slitsmursentreprenören. För att få en bra betongkonstruktion är flödet av betongen viktig. Tidigare nämndes att tillräckligt många gjutrör bör användas för att få ett bra horisontellt flöde i slitsen. Det vertikala flödet är minst lika viktigt för ett gott resultat och beror till stor del på stighastigheten. När flera gjutrör används är det viktigt att respektive gjutrör har ungefär samma stighöjd. Alltså, att ungefär samma mängd betong hålls i gjutrören samtidigt. Utöver att betongfronten ska vara jämn över slitsens längd ska samma stighastighet försöka hållas under hela gjutningen. Ett jämt flöde av betong utan avbrott eller andra störningar ger bättre resultat (SS-EN 1538:2010+A1:2015). Ett jämt flöde innebär att betongbilarna måste komma i god tid och i lagom utsträckning stå redo på rad att fortsätta gjutningen.

Vilken stighastighet som är lämplig beror på flera saker. Allt från betongsammansättningen till vad som är praktiskt möjligt att få levererat från betongstationerna spelar roll. Stighastigheten bör inte understiga 3 m/h. Om stighastigheten är för låg riskeras betongen att blandas med stödvätskan (SS-EN 1538:2010+A1:2015). I den österrikiska riktlinjen finns ingen övre gräns (Deix 2019). I den svenska standarden finns en övre gräns 10 m/h (SS-EN 1538:2010+A1:2015). I rapporten *Slitsmurar som permanenta konstruktioner* diskuteras varför en övre gräns existerar i den svenska standarden för utförandet. Två anledningar tas upp för diskussion. Den första är att det i praktiken är svårt att gjuta i högre hastighet än 10 m/h. Den andra anledningen är att betong med lös konsistens riskerar att separeras vid för höga stighastigheter. Det är denna typ av betong som används vid slitsmursutförandet. Därför diskuteras att 3–5 m/h bör rekommenderas med hänsyn till risk för separation av betongen. Det poängteras dock att risken för separering bör utredas vidare (Alén et al. 2006). En summering av stighastigheten vid gjutning av slitsmur är enligt Scholz att en snabb gjutning oftast är en bra gjutning (Christian Scholz, 9 maj 2023).

4.8 Kapning

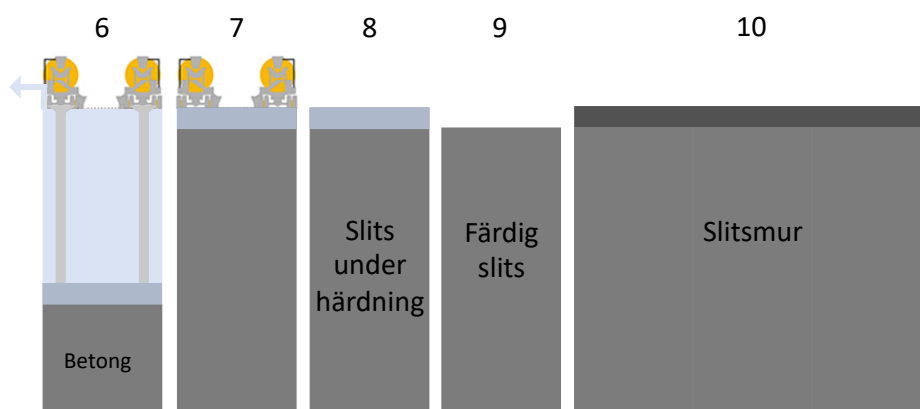
Utförandeprocessen av en slitsmur visas i Figur 59 och är uppdelad i delprocesser.



Figur 59 - Utförandet av en slitsmur, delprocess: kapning av uppblandad betong för att erhålla god betongkvalitet

Som nämndes i tidigare avsnitt består panelens översta del av sämre betongkvalitet på grund av uppblandning. Antingen kan den uppblandade betongen pumpas bort medan den fortfarande inte har styvnat. Eller kapas toppen av panelen bort när betongen har härdnat. Det är den sistnämnda som beskrivs i den svenska standarden och därmed beskrivs den även här. Enligt den tyska standarden för stabilitetsanalyser av slitsmurar ska åtminstone 0,5 m av panelens topp kapas (DIN 4126:2013–09). Se steg 9 i Figur 60 som visar fortsättningen på Figur 55. Kapningen bör gå varsamt till så att inte armering eller betong med bättre kvalitet skadas.

Efter att panelen har kapats är utförandet av panelen färdig. Därmed kan egentligen avsnittet avslutas men för att få en samverkande konstruktion utförs vanligtvis ytterligare ett steg. När flera intilliggande paneler är färdigställda, inklusive kapning, gjuts oftast en kontinuerlig balk, se steg 10 i Figur 60. Figur 61 visar hur balken armeras ihop med panelerna.



Figur 60 – Fortsättning på schematiskt gjutförlopp, Figur 55. Steg 6–8 ovan markerar gjutningens slutfaser inklusive härdning. Steg 9 markerar kapningen av den uppblandade betongen. Steg 10 markerar gjutningen av den kontinuerliga balken över flera färdiga paneler. Det är i detta steg som de separata panelerna blir en samverkande slitsmur



Figur 61 - Den kontinuerliga balken (steg 10 i Figur 60) armeras ihop med uppstickande armeringsjärn från panelerna

Den kontinuerliga balken har flera funktioner, varav två är att den skapar en samverkande konstruktion och lastfördelar mellan panelerna. Balken gjuts som konventionella betongkonstruktioner, det vill säga med konstruktiv form och vibration, vilket genererar en hög bärighet. En hög bärighet möjliggör i sin tur att andra konstruktioner eller att belastningen från stag kan tas upp av balken. Det senare exemplifieras i Figur 62 och 63.

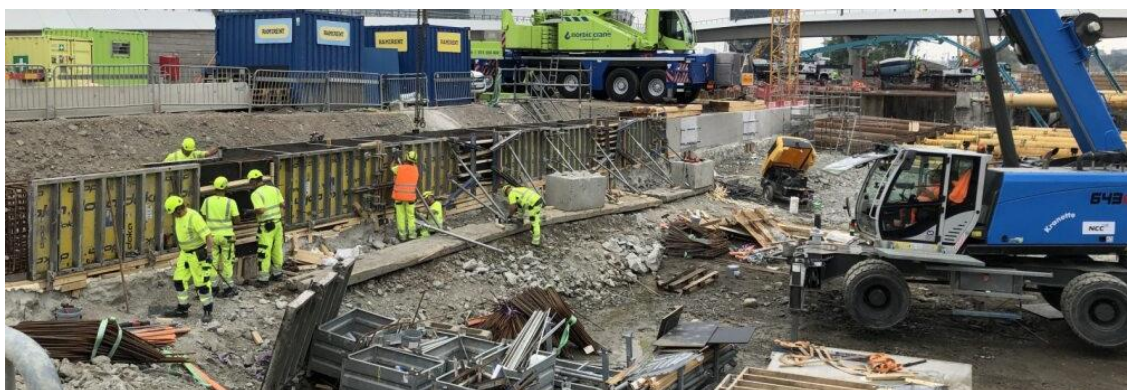
Fotografierna togs på var sida om slitsmuren under studiebesök den 20 januari och 20 juni 2023 på E02 Centralen, Västlänken. Slitsmuren är frilagd och den pågjutna balken tar upp laster från stämp på båda sidor. Figur 62 visar ena sidan av slitsmuren medan Figur 63 visar den andra sidan. I Figur 64 visas hur fortsättningen av balken formas och armeras.



Figur 62 – Den kontinuerliga balken sett från ena sidan. Notera balkkonstruktionen inkl. stämp och slitsmur



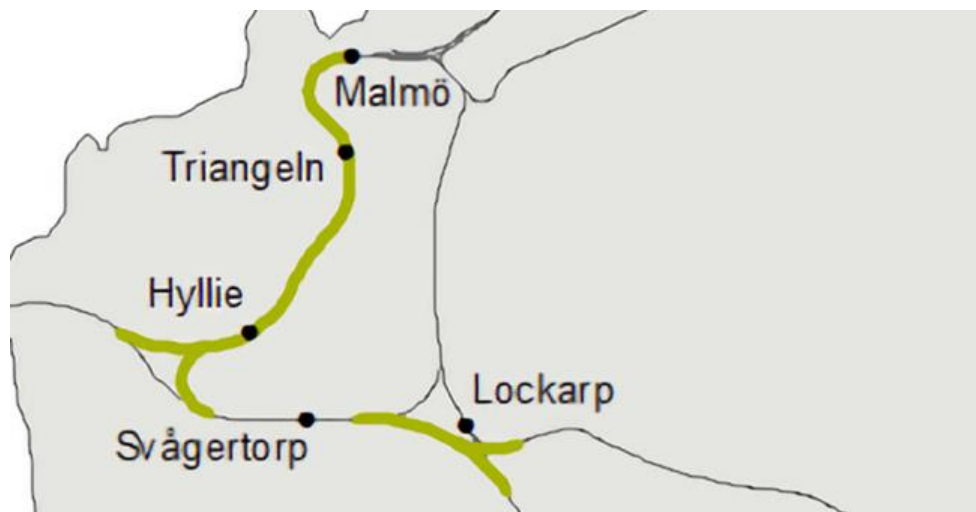
Figur 63 - Hur den kontinuerliga balken ser ut från andra sidan, två olika vyer. T.h. notera stämplet mot balken



Figur 64 - Den kontinuerliga balken formas och armeras. Fotografiet är taget från samma sida som figur 63

5 Fallstudie av E101 Malmö C nedre

Av flera anledningar krävdes en utbyggnad av järnvägsnätet i Malmö. Kortare pendlingstider och ökad spårkapacitet är två exempel. Under tidigt 2000-tal påbörjades därför byggnationen av citytunneln i Malmöregionen, se Figur 65. Utbyggnaden innebar nya spår under mark samt de tre nya stationerna: Hyllie, Triangeln och Centralstationen nedre. Beställare för projektet var Banverket, SJ, Malmö stad och Region Skåne. Det var Banverket som var huvudman (Brantmark, Damgaard, Kolbjörnsen, Schraml, Berg & Abel 2008).



Figur 65 - Skiss över hur hela Citytunneln i Malmö utfördes. De svarta prickarna markerar stationerna (Trafikverket 2022)

För att kunna dra slutsatser om varför slitsmuren är mer lämplig än andra metoder under vissa förutsättningar, görs en fallstudie av ett verkligt svenskt projekt. Syftet är att ta reda på vid vilka förutsättningar slitsmurstekniken är ett lämpligt metodval.

När Citytunneln i Malmö byggdes användes slitsmurstekniken i ett av delprojekten. Delprojektet har studerats då det finns mycket information att tillgå, i form av exempelvis erfarenhetsåterföring, eftersom projektet avslutades för över 10 år sen. Det har även valts ut då användandet av slitsmurstekniken i projektet var lyckat. Därmed verkar förutsättningarna för att använda metoden med slitsmur ha varit rätt. För att skapa en helhetsförståelse för projektet presenteras först övergripande information om hela Citytunnelprojektet. Sedan görs en djupdykning i delprojektet. Här beskrivs *varför* man valde att använda slitsmurstekniken samt vilka geoförhållanden som rådde.

Under Malmö stad går de tillkomna spåren i två parallella tunnlar med längden 6 km vardera. Tunnelarna utfördes delvis med öppet schakt och delvis med två tunnelbormaskiner. Citytunnelprojektet delades in i 5 entreprenader (Brantmark et al. 2006). I ett av dem, Malmö centralstation nedre, användes slitsmurar och det är därför en fallstudie av detta delprojekt görs.

5.1 Entreprenad Malmö C nedre

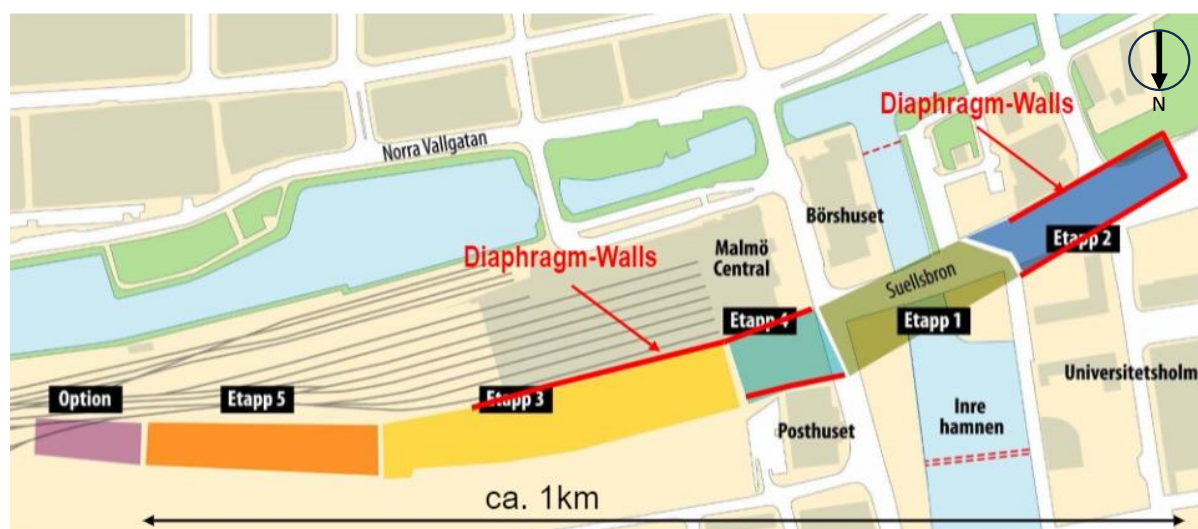
Kontraktet för centralstationsetappen, *E101 Malmö C nedre*, utgjordes av: utbyggnad av den befintliga stationen med en ny underjordisk stationsdel, anläggning av 400 m tunnel samt en spårramp för anslutning mellan de tillkomna underjordiska spåren och de markgående spåren (Scholz & Linder 2007).

Kort information om projektet:

- Tid för utförande: 2005–2008
- Huvudentreprenör: NCC Construction Sverige AB
- Underentreprenör slitsmur: Brückner Grundbau GmbH

Projektet utfördes som en öppen schakt (engelska: cut-and-cover) vilket innebar att temporära stödkonstruktioner utfördes i marken. Sedan började man schakta genom att öppna upp det stora schaktet till önskat djup. Schaktet stabiliserades med de tidigare utförda temporära stödkonstruktionerna. Efter stabiliserat och öppnat schakt anlades den underjordiska konstruktionen och sedan återfylldes schaktet (Scholz & Linder 2007).

Av flera anledningar delades projektet in i etapper, se Figur 66. En anledning var att genom etappvist schaktande möjliggjordes trafikomläggning för att minimera störningar. Ytterligare anledning var en form av riskhantering. Bland annat för att begränsa inflödet då konduktiva zoner fanns. Mer om de konduktiva zonerna i avsnitt 0. En tredje anledning var av praktiska skäl då propumpning kunde utföras och på så sätt kunde tätskärmarna testas mer begränsat (PM erfarenhet 2008). Varje deltapps schakt var ungefär 1 km långt och upp till 45 m brett. Då det var en ramp som anlades varierade grundläggningsdjupet mellan 2,5 m och 22 m. Slitsmurarna utfördes till ett djup på mellan 14–24 m (Scholz & Linder 2007).

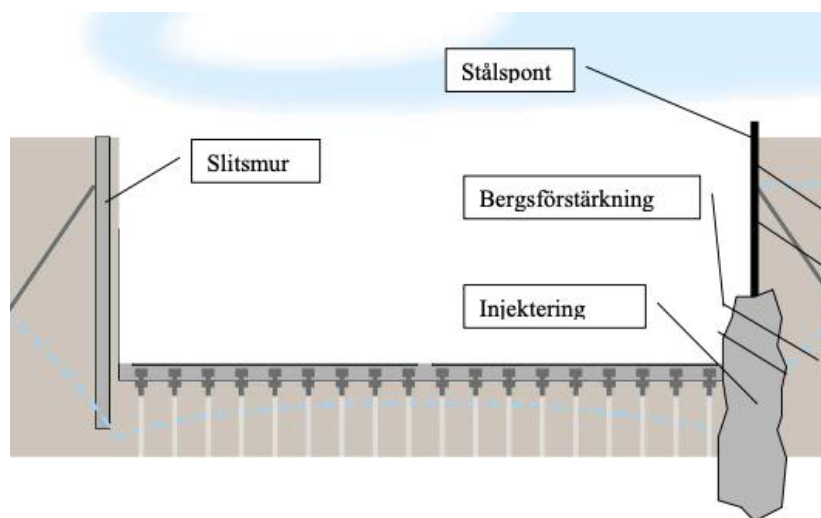


Figur 66 - Etappindelning av E101 Malmö C nedre. Observera norrpilen. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

Tre olika typer av temporära stödväggar användes i projektet:

- Stålspont – i lösare jordmaterial
- Sprutbetong med varierande förstärkning (bultar mm) – i hårdare material (berg)
- Slitsmur – i både jord- och bergmaterial

Stålsponten och sprutbetong användes i kombination med varandra när djupet så pass stort att bergschakt uppstod, se Figur 67. Samtliga stödväggar förankrades temporärt (Möller & Blomqvist 2008).

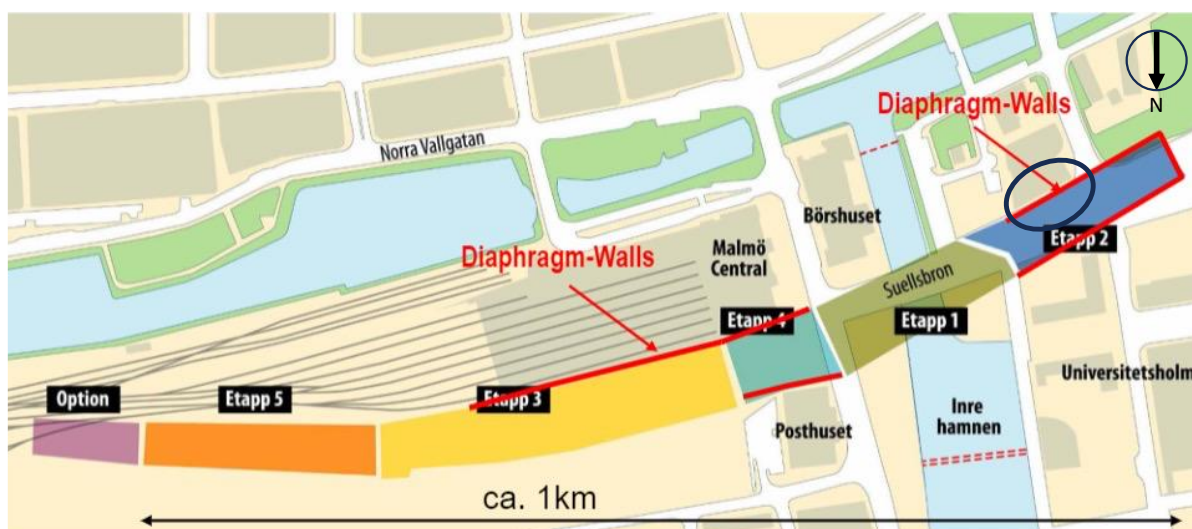


Figur 67 – Princip över de två stödkonstruktionerna. T.v. slitsmur med bakåtförankring. T.h. bakåtförankrad stålspont med sprutbetong för att förstärka bergschakten. Notera att höger sida injekteras (Möller & Blomqvist 2008, s. 26)

5.2 Varför valdes slitsmur?

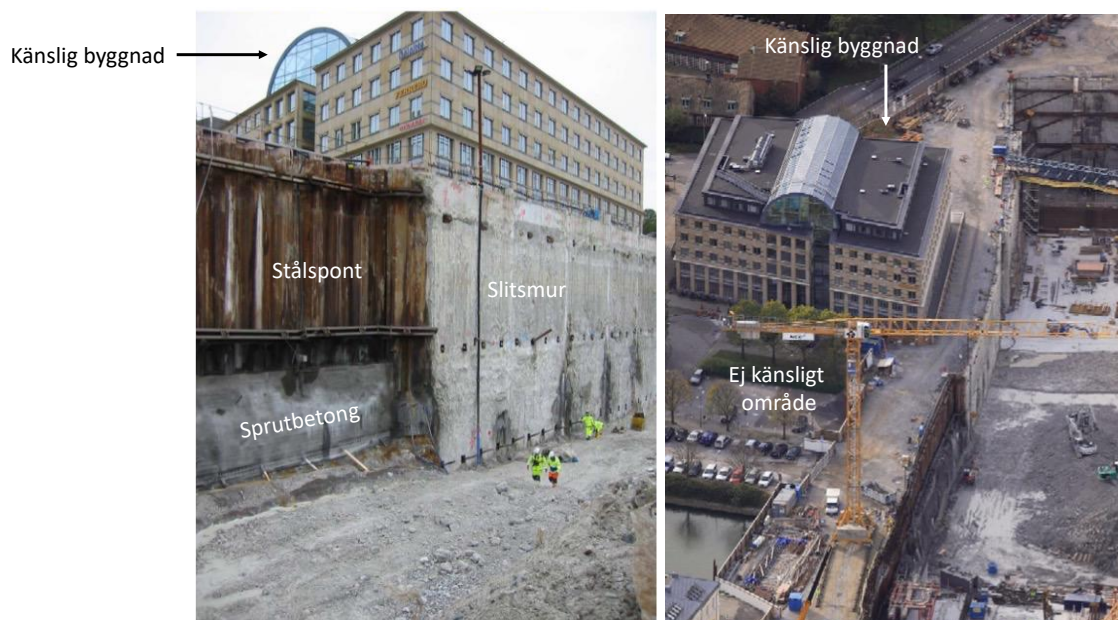
Sammanfattningsvis berodde valet av stödvägg i huvudsak på två faktorer: känsligheten av den bebyggda omgivningen samt djup till berg. Figur 68 nedan markerar vilka schaktväggar som bestod av slitsmurar (etapp 2, 3 och 4) (Scholz & Linder 2007). Förklaring till varför slitsmursmetoden valdes följer nedan.

Den första anledningen till att metoden användes är tack vare slitsmurens låga omgivningspåverkan vid installation. Lägre än för installation av stålspont. Därför valdes slitsmuren som stödvägg där känslig bebyggelse låg intill (Scholz & Linder 2007). Ett exempel finns i etapp 2. Området har markerats ut med en svart ring i Figur 68.



Figur 68 - Röda heldragna linjer markerar slitsmur som stödvägg. Svart ring visar känsligt område vilket är anledningen till att slitsmuren användes som stödkonstruktion i området. Observera norrpilen. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

I området finns ett hus bestående av två separata huskroppar som båda är ytligt grundlagda. Huskropparna hänger ihop genom en gemensam glaskupol på taket. Huset låg dessutom nära schaktkanten vilket alltsammans klassificerar området som känsligt. I direkt anknnytning till det känsliga huset finns en parkeringsyta och lite grönska som inte är lika känsligt för sättningar (Christian Scholz, 9 maj 2023). Figur 69 och 70 visar hur stödväggarna utformades på plats från två olika vyer.



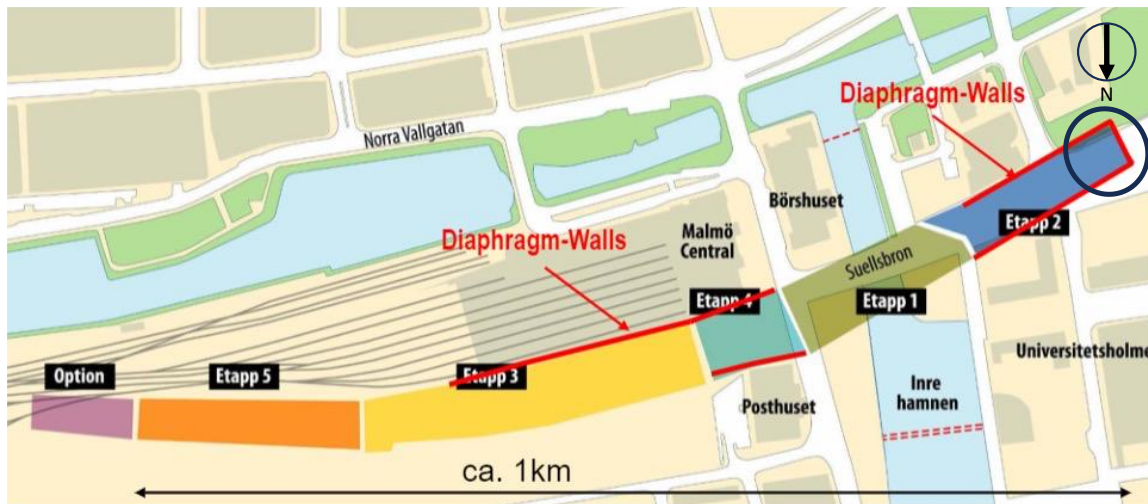
Figur 69 - Vy från schaktbotten. De tre stödskonstruktionerna är markerade. Slitsmuren användes vid den känsliga byggnaden. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

Figur 70 - Vy från ovan. Bebyggelsens känslighet är markerad. Notera slitsmurens slut. Redigerad figur (Möller & Blomqvist 2008)

Figur 69 till vänster visar mötet mellan samtliga tre stödväggstyper sett från schaktet. I Figur 70 till höger visas samma område fast uppifrån. Längs det känsliga huset användes slitsmurar för att minska påverkan på omgivningen. Längs parkeringsytan användes stålspont och sprutbetong. Utöver husets ytliga grundläggning och känsliga glastak var byggnaden redan sedan tidigare sättningsskadat. Det var ytterligare en anledning till att slitsmur som stödvägg användes (Christian Scholz, 9 maj 2023).

Ett annat exempel där slitsmurar användes för att minska risken för sättningar är längs spåren i etapp 3. Även utanför posthuset som är ytligt grundlagt (Christian Scholz, 9 maj 2023).

Utöver slitsmurens låga omgivningspåverkan används slitsmurar vid djupa grundläggningar eftersom konstruktionens styvhet är hög. Ett exempel finns bredvid byggnaden med glaskupol och är markerat i Figur 71 med en svart cirkel. Här var grundläggningen så pass djup att slitsmurar var det mest lämpliga metodvalet (24 m djupa paneler) (Christian Scholz, 9 maj 2023).



Figur 71 - Röda heldragna linjer markerar slitsmur som stödvägg. Svart ring visar området för djup grundläggning vilket var anledningen till att slitsmuren användes. Observera norrpilen. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

5.3 Markförhållanden och dess inverkan på produktionen

Under följande kapitel beskrivs geologin och hydrogeologin med kopplingar till produktionen.

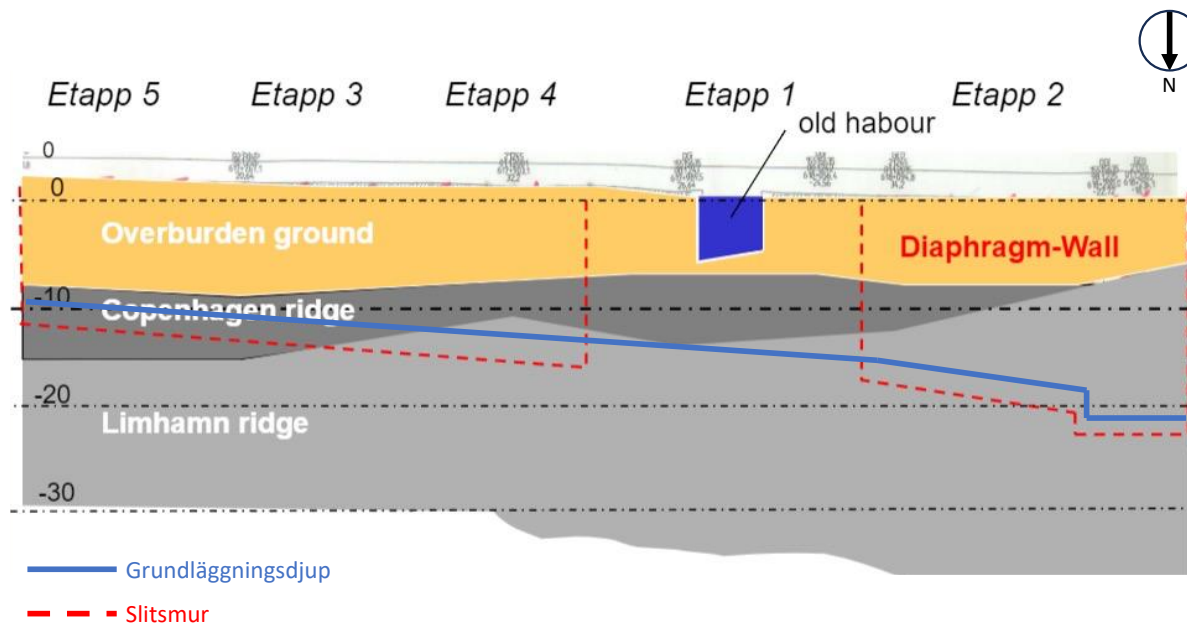
Det kan nämnas att man, tack vare tidigare erfarenheter, hade god kännedom om geologi, geohydrologi och geotekniken redan innan projektet genomfördes. Utöver de tidigare erfarenheterna utfördes förundersökningar. Några exempel är kärnborringar, hammarborringar, provpumpningar, injekteringsförsök samt provspontning. Tack vare en gedigen databank över förhållandena i marken stämde förfrågningsunderlaget relativt bra överens med verkligheten (Möller & Blomqvist 2008). De metodval som gjordes, exempelvis att använda slitsmurstekniken, gjordes alltså på goda grunder.

De avvikelser från förfrågningsunderlaget som uppdagades under projektets gång (Möller & Blomqvist 2008), och påverkade slitsmursproduktionen är:

- Hårdhet: Mängd förkislad kalkberg samt tjocklek på flintbankar – se Geologi
- Kalkbergets sprickighet – se Geologi samma som punkt 3 egentligen
- Översta lagret av kalkberget kraftigt vittrat – se Hydrogeologi
- Vertikal hydraulisk konduktivitet – se Hydrogeologi

5.3.1 Geologi

Geologin ovanför urberget består i huvudsak av mäktiga sedimentära berglager (uppåt 2000 m) som överlagras av ett tunt jordlager (runt 8 m) (Brantmark et al. 2006). Se Figur 72 för markprofil. Slitsmurarnas anläggningsdjup är markerat med röstreckad linje i figuren. Bottenplattan är markerad med blå linje.



Figur 72 - Longitudinell sektion och markprofil. Slitsmurarnas placering och anläggningsdjup är markerat med streckade röda linjer. Blå heldragen linje markerar grundläggningsdjupet för bottenplattan. Observera norrpilen. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

Den geologisk lagerföljden med dess mäktighet är (Scholz & Linder 2007):

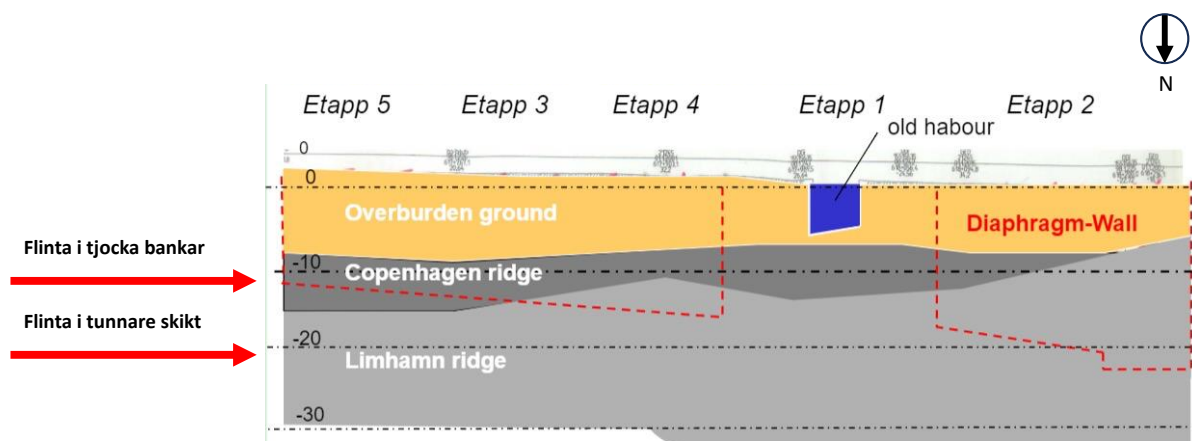
- Jordlagret, medeltjocklek 8 m
- Köpenhamnskalkstenen, medeltjocklek 3 m
- Limhamnskalksten (även kallad Bryozokalkstenen), medeltjocklek 70 m

Jordlagret består av fyllnadsmaterial, postglaciala sediment och glacial lermorän. Under det finns kalkberget (Scholz & Linder 2007).

Båda kalkstenarna har bildats i marin miljö för ungefär 65 miljoner år sedan, efter kritaperioden. Bryozokalkstenen är äldst och sedimenterades på djupare vatten än Köpenhamnskalkstenen (Brantmark et al. 2006). Sedan bildningen har både landshöjningar, nedisningar och erosion påverkat geologin (Möller & Blomqvist 2008). De skiftande förhållandena har skapat en lagervis uppbyggnad med skiftande innehåll och egenskaper (BK-dagen).

Innehållsmässigt är båda kalkstenarna uppbyggda av lera, karbonatrikt slam och skalrester. Bryozokalkstenen innehåller dessutom mineralen glaukonit (Möller & Blomqvist 2008). Bryozokalkstenen har fått sitt namn eftersom den innehåller bryozoer som är ett fossilt mossdjur (Brantmark et al. 2006).

Hårdheten på berg delas in i 5 kategorier, från H1 som är mycket mjukt berg till H5 som är mycket hårt berg. Berg i kategori H1 kan skrapas med en nagel medan berg i kategori H5 inte kan skrapas. Berget kan endast påverkas av dynamisk inverkan som upprepade slag med hammare (Christian Scholz, 31 juli 2023). En egenskap som har påverkat projektet är den kraftigt varierande hårdhetsgraden i berglagren. Det är innehållet av kiselsyra som ligger bakom den varierande hårdheten. Kalksten som förkislas, det vill säga innehåller större mängd kiselsyra, blir till sist flinta som har hög hårdhet (Möller & Blomqvist 2008). Flintan var generellt i klass H5 och utgjorde de hårdaste lagren i kalkstenen. Köpenhamnskalkstenen innehöll flinta i tjocka bankar medan det endast förekom i tunnare skikt i Bryozokalkstenen, se Figur 73 (Scholz & Linder 2007).



Figur 73 - Longitudinell sektion och markprofil. Flinta i tjocka bankar förekom i Köpenhamnskalkstenen. Flinta i tunnare skikt förekom i Bryozokalkstenen (Limhamnskalkstenen). Observera norrpilen. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

Två av avvikelserna från förfrågningsunderlaget gäller mängden hårda bergspartier. Den första avvikelserna var att förkislning hade skett i större utsträckning än man hade angett i förfrågningsunderlaget. Det betyder att berget bitvis var hårdare än man hade räknat med. Den andra avvikelserna var att tjockare flintbankar än man hade angett hittades. Tjocklekar på upp till 120 cm påträffades. De hårdare partierna försvårade och saktade ner produktionen, exempelvis vid schaktarbetet eller borring. Dessutom sliter hårt berg på utrustningen (Möller & Blomqvist 2008). Ungefär 35 % av bergmassan innehöll hårdare partier (Scholz & Linder 2007).



Figur 74 - T.v. Köpenhamnskalkstenen. T.h. Bryozokalkstenen, observera de svarta inslagen av flinta.
Notera även båda bergarternas horisontella lagerföljd (Möller & Blomqvist 2008, s. 12)

I Figur 74 visas två bergväggar. Till vänster visas den yngre Köpenhamnskalkstenen och till höger visas den äldre Bryozokalkstenen. Båda kalkstenarna har en horisontell lagerföljd. Den yngre kalkstenen består av bankar på upp till 50 cm i tjocklek. Bankarna består dels av kalksten med inslag av lera, dels av flinta eller förkislad kalksten som har en gråaktig färg. Den äldre kalkstens bankar är mellan 4 och 40 cm tjocka och består av kalkslam. Bankarna avskiljs av tunna leralager (Möller & Blomqvist 2008). I den äldre kalkstenen i figuren till höger syns flinta som svarta inslag (Scholz möte 9 maj).

Figur 75 nedan visar exempel på stenmaterial från slitsmurschakten. De mörka inslagen är förkislad kalksten eller flinta (Scholz möte 9 maj). Dess hårdhet gör det svårt att sönderdela stenen vilket påverkade slitsmursproduktionens framfart.



Figur 75 - Exempel på uppschaktat stenmaterial. Notera den stora storleken på stenmaterialet vilket försvårade uppschaktning med gripskopa (Scholz & Linder 2007)

Förutom avvikelser gällande bergets varierande hårdhet fanns avvikelser gällande bergets sprickighet. Förklaringen till sprickorna är kemisk vittring snarare än alla på- och avlastningar sedan bildningen. Berggrundens översta 2 metrar har urholkats på grund av att surt grundvatten har cirkulerat och löst upp karbonater från den karbonatrika berggrunden. Alltså är det översta lagret av berget väldigt vattenförande i och med alla sprickor. En påminnelse om kalkstens innehåll som beskrevs på föregående sida är att kalkstenen innehåller lera, karbonatrikt slam och skalrester. Köpenhamnskalkstenen, som är yngst och därmed överst, innehöll även horisontella tjocka bankar av flinta. Tack vare de horisontella lagren av lerskikt och förkislade

banker har vittringen endast skett på ytan. Det är eftersom leran och det förkislade berget inte påverkas kemiskt av processen (Möller & Blomqvist 2008).

Det generella fallet är alltså ett kraftigt vittrat översta lager med en mäktighet på 2 m. Etapp 3 skiljer sig från det generella fallet vilket nämndes ovan i avsnitt 5.2. Här har det lokaliserats en zon av ett djupgående spricksystem. I samma område ökar dessutom mäktigheten av vittrat berg från 2 till så mycket som 4 m vittrat berg (Möller & Blomqvist 2008).

Med avvikelserna i ryggen kan det summeras till att två områden vid installationen av slitsmurarna var problematiskt med avseende på geologin. Sett från marknivå och nedåt kunde jordlagret enkelt grävas i. Första problematiken fanns i övergångszonen mellan jordlagret och berget. Här fanns det kraftigt vittrade berget och de varierande fraktionerna där stora block framför allt försvårade schakten. Andra problematiken fanns i berget där variationen mellan hårt och mjukt berg var stor. För att ge förståelse för påverkan på framdriften är att fräsen är effektiv i berg med en hårdhet på upp till ungefär 100–120 MPa. Flintan är i klass H5 med en hårdhet på 400 MPa och uppåt. Därmed saktades framdriften ner avsevärt (Scholz & Linder 2007). Blandningen av stora och små fraktioner samt variationen av hårt och mjukt material, försvårade schaktarbetet. Till höger i Figur 75 visas exempel på ett stort block som fanns i slitsschaktet.

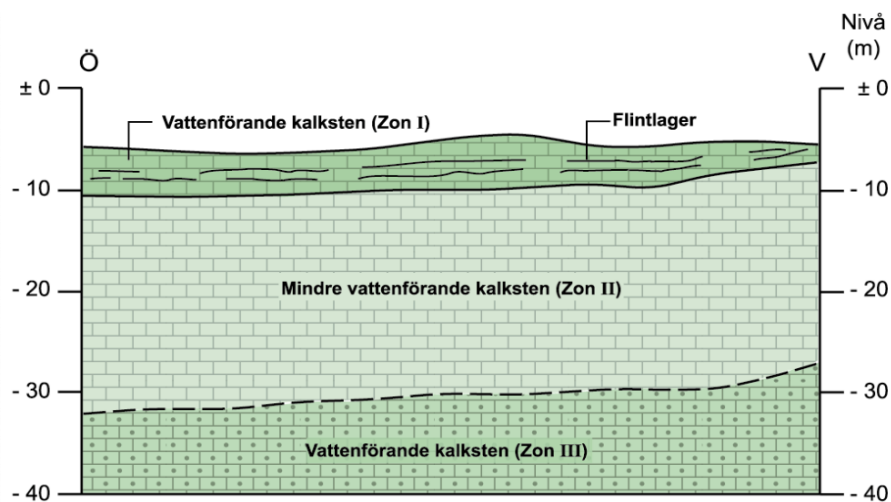
Produktionsmässigt löstes problemen med den varierande geologin genom att totalt tre maskiner fanns på plats. En servicemaskin, vilket alltid finns, och två schaktmaskiner med olika aggregat vilket var speciellt. Maskinen med gripskopa, till vänster i Figur 76, började genom att schakta jordmaterialet och löst berg. När det blev hårdare markförhållanden byttes maskinen ut mot den andra maskinen som fräste ner berget, till höger i Figur 76. Vid stora block och riktigt hårda förhållanden, det vill säga över 120 MPa, användes mejsel för att dynamiskt slå sönder blocken och berget.



Figur 76 - T.v. Gripskopa för löst material. T.h. Fräs för hårt material (Möller & Blomqvist 2008, s. 31)

5.3.2 Hydrogeologi

Precis som för den geologiska modellen fanns god kännedom om områdets förhållanden sedan tidigare. Därför stämde även den hydrologiska modellen bra överens med verkligheten. Det fanns i huvudsak två avvikelser från förfrågningsunderlaget. Se Figur 77 för berggrundens hydrologiska förhållanden (Möller & Blomqvist 2008).

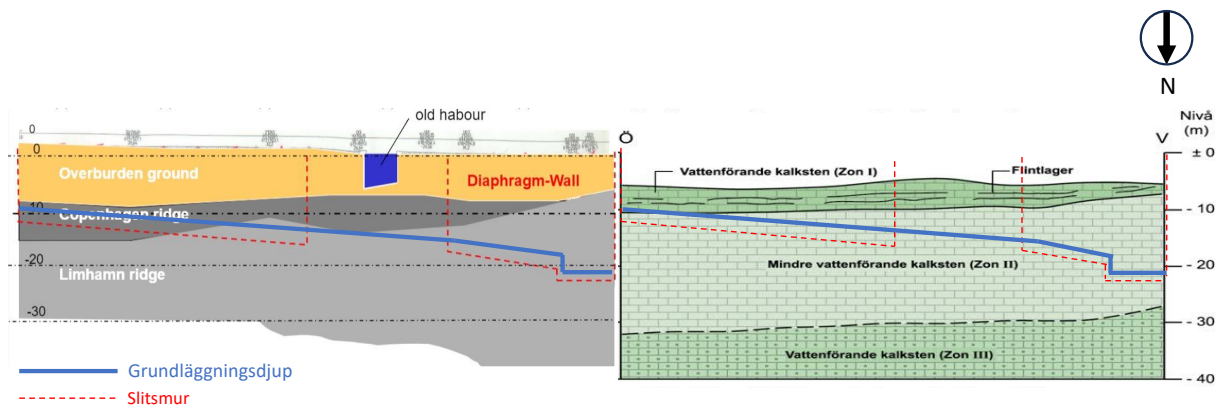


Figur 77 - Longitudinell sektion över den hydrogeologiska modellen (Möller & Blomqvist 2008, s. 13)

Hydrogeologiskt består berggrunden av tre zoner. Zon I är starkt vattenförande och härleds till övergångszonen med den kemiskt vittrade överytan av berget som beskrevs i tidigare avsnitt. I zon I fanns även den första avvikelser, nämligen mäktigheten. Man trodde att zon I hade en mäktighet mellan 2–8 m men den var bara likt tidigare nämnt max 2 m. Undantaget var i etapp 3, som nämndes i föregående avsnitt, där vittrat berg gick till 4 m djup (Möller & Blomqvist 2008).

Zon II var mindre vattenförande. Det vattenflöde som fanns var främst kopplat till den horisontella lageruppbyggnaden. Den vertikala vattenföringen var mindre än man hade räknat med vilket var den andra avvikelser. I etapp 2 nyttjades att det var lägre vattenföring vertikalt än man först hade trott. I etapp 2 installerades slitsmuren djupast och passerade därmed tre lerlager. Slitsmuren installerades till zon II och här utfördes en portryckssänkning i zon II. Ett minskat grundvattentryck i botten av konstruktionen innebär att mindre mängd förankring behövs. I vanliga fall påverkas grundvattenytan runt omkring området där trycksänkningen sker men på grund av den låga möjligheten för vertikalt flöde påverkades inte grundvattenytan. (Möller & Blomqvist 2008).

Zon 3 hade stor vattenföring men påverkade inte projektet nämnvärt då anläggningen låg ovanför zon 3. Se Figur 78 och 79 nedan för modelljämförelse mellan geologi och hydrogeologi. Observera norrpilen.



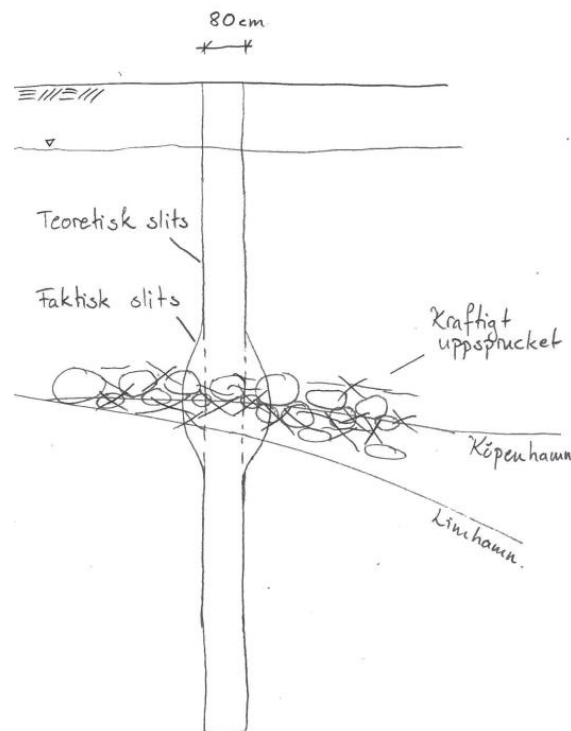
Figur 78 – Longitudinell geologisk modell. Notera norrpilen. Jämför den geologiska lagerföljden med hydrogeologin. Redigerad figur (Scholz & Linder 2007)

Figur 79 – Longitudinell hydrogeologisk modell. Notera norrpilen. Jämför den vattenförande indelningen med geologin. Redigerad figur (Möller & Blomqvist 2008, s. 13)

5.3.3 Produktionsmässiga konsekvenser

Den produktionsmässigt svåra övergångszonen (hydrogeologiska zon I) bestående av vittrat berg, variation mellan mjukt och hårt material samt stora och små fraktioner medförde inte bara problem att penetrera under schaktningen. Figur 80 visar en skiss över utseendet av den teoretiska och den faktiska slitsen. I teorin har slitsen en rektangulär form med raka slitsväggar. I praktiken när man kom ner till övergångszonen kan det sammanfattas till att extra mycket löst material schaktades ut ur slitsen samtidigt som extra mycket stödvätska pumpades in. Extra mycket löst material försvann av olika anledningar. Den främsta var att då berget bestod av varierande hårdhet innebar det att fräsens framdrift nästintill avstannade då den stötte på hårda lager eller block. Medan blocket långsamt frästes ner under lång tid pumpade fräsens pump med samma kapacitet som tidigare. Då de hårda inslagen varierades med mjuka och lösa lager blev konsekvensen att de lösare lagren pumpades ut. Utbuktningar i slitsväggarna uppstod i denna zon vilket visas i skissen. När mer stödvätska än den teoretiska volymen går åt i slitsen kallas det för förlust av stödvätska och kan även läsas om i avsnitt 4.3. För att åtgärda förlusten av stödvätska injekterade man i övergångszonen (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Enligt erfarenhetsåterföringen fylldes slitsarna upp med reservstödvätska när förlust skedde. I etapp 4 var förlusten av stödvätska så stor att man tillfälligt fyllde upp slitsen med betong när reserven började ta slut. Vid senare tillfällen när förlusten blev stor hällde man i stället i sand eller finfrästa kalkbergsmassor (2-4mm). Den totala förlustmängden var ungefär 1800 m³. För att minska förlusterna förinjekterade man sedan på flera ställen längs sträckan. Främst skedde förlust av stödvätska i etapp 3 och 4. Här förinjekterade man också främst (Möller & Blomqvist 2008)

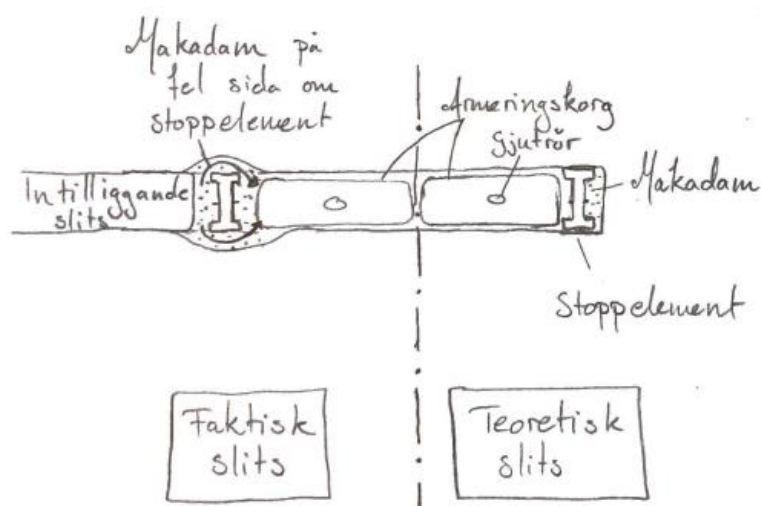


Figur 80 – Tvärsektionsskiss av slitsen vilken fick produktionsmässiga konsekvenser. Jämför den teoretiska och faktiska slitsformen. Den faktiska slitsformen (i form av en bula) uppstod eftersom övergångszonen mellan jord och berg var kraftigt uppsprucket och bestående av varierande hårdhet. Skiss baserad på mötesskiss (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023)

Mängden stödvätska som går åt kan enkelt beräknas och kontrolleras och därigenom upptäckas om praktiken skiljer från teorin. Schaktmassorna däremot kan man inte jämföra på samma sätt. Därför visste man inte om att slitsen hade ändrat form.

När slitsen var urschaktad och rengjord sattes armeringskorgar, gjutrör och stoppelementen ner. I samma takt som slitsen fylldes med betong, fylldes hålrummen bakom stoppelementen med makadam, se högra sidan av Figur 81. Betongen och makadammen fylldes parallellt för att stoppelementet skulle vara lodrätt. Hade makadam fyllts på hela vägen upp hade stoppelementet tryckt in i slitsen.

När man kom till den utbuktade delen stannade inte makadammen kvar bakom stoppelementet utan åkte in i slitsen, se vänstra sidan av Figur 81. Ovanför denna zon gick gjutningen som planerat. När man sedan hade schaktat fram den färdiga slitsmuren såg man lokala problem, se Figur 82 för fotografi. Fotografiet är taget av Per Lindh på *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Problemen åtgärdades genom rensning och lagning med ny frisk betong.



Figur 81 – Samma slits som Figur 80, vy från ovan. Jämför den faktiska och teoretiska slitsformen. Den faktiska slitsformen, som var förstörd då den hade formen av en bula, fick konsekvensen att utfyllnadsmaterial (makadam) föll in i slitsen under gjutförloppet. Den teoretiska slitsformen förhindrar utfyllnadsmaterial från att passera förbi stoppelementet. Skiss baserad på mötesskiss (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023)



Figur 82 - Fotografi av skadorna från makadaminträngningen. Åtgärden blev borttagning och rensning av inträngd makadam, sedan betonglagning för att erhålla fullgod kvalitet och täckning av armeringen (Fotografi: Per Lindh 2006)

6 Diskussion

Slutresultatet av slitsmuren visas först när slitsmuren är färdigställd och schaktas fram. I vanliga fall är slitsmursutrustningen av etablerad vid det laget. Alltså syns inte eventuella fel förrän det är för sent att åtgärda på direkten. Ett exempel på detta togs upp i avsnitt 5.3.3, fallstudien av *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Man märkte förlusten av stödvätska i övergångszonen eftersom den är mätbar och jämförbar mellan teori och praktik. Vad man inte kan mäta och jämföra är uttaget av det geologiska materialet. Konsekvensen blev att ett för stort uttag gjordes och makadam föll följaktligen in i betongkonstruktionen under gjutningen. Lagning blev åtgärden eftersom det upptäcktes först efter framschaktning.

Det generella fallet är att fel och problem åtgärdas i form av lagningar av slitsmuren snarare än att man har möjlighet att justera undertiden de sker. Det betyder att extra vikt bör läggas i tidigt skede för att minimera riskerna. Med tidigt skede menas planering, undersökningar, utformning, utförande med mera. Det vill säga, allt som sker innan slitsmuren står klar behöver läggas extra vikt vid för att efterarbetet ska bli så litet som möjligt.

Forskning pågår om hur man skulle kunna fånga upp problem innan slitsmurarna schaktas fram. Det är fortfarande på forskningsnivå och inget som kan nyttjas i dagsläget (van Tol, Spruit, van Dalen, & Admiraal 2014)

I diskussionen diskuteras faktorer som påverkar slutresultatet av slitsmuren. Faktorerna delas in i tekniska och organisatoriska diskussioner. Dessutom diskuteras kort den ekonomiska aspekten av slitsmuren. Som avslutning på diskussionen presenteras en arbetsmetod som främjar ett gott slutresultat. Ett gott slutresultat innebär en slitsmur som har god funktion och där inget omfattande efterarbete krävs.

6.1 Teknisk diskussion

Följande teknisk diskussion baseras i stor utsträckning på fallstudien av *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, samt de tekniska diskussionerna som hölls den 13 och 14 juni på Lunds tekniska högskola. Även muntlig kommunikation våren 2023 med experter på området har ägt rum.

6.1.1 Grundvattnets påverkan på utformning

Slitsmurens utformning är starkt korrelerad till grundvattnet. Det är framför allt två utformningsfaktorer som påverkas av grundvattnet: slitsens längd samt om slitsmuren ska utföras med innervägg eller inte i de fall den används permanent (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Slitsens längd

Vid dimensionering av slitsarna är utgångspunkten att schaktet måste vara stabilt från att schaktning påbörjas till dess att betongen har härdat. Det är framför allt längden på slitsen, det vill säga inte tjocklek eller höjd, som avgör stabiliteten. Det beror på att en större längd innebär större schakt vilket i sin tur innebär sämre stabilitet. Likt tidigare nämnt strävar man efter stora

slitslängder. En större slitslängd innebär både färre fogar längs slitsmuren och en snabbare tillverkningsprocess då färre paneler behöver tillverkas (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023)

Dimensioneringen av slitsmuren börjar med att man tar fram den dimensionerande grundvattennivån. Det i sin tur avgör hur stort vattentrycket blir på slitsen. Utifrån rådande tryck bestäms slitslängden. Slitslängden i sin tur avgör armeringens utformning (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023).

Man måste bevisa att schaktet kommer att vara stabilt till dess att betongen har härdat. Med andra ord måste slitslängden bevisas fungera under rådande tryck. I den svenska standarden för slitsmursutförandet finns tre sätt att bevisa att slitslängden kommer att fungera (SS-EN 1538:2010+A1:2015):

- Testa slitslängden i fullskaletest
- Slitslängden baseras på erfarenhet i jämförbara förhållanden
- Beräkna stabiliteten för öppet schakt
 - Exempelvis enligt DIN 4126:2013–09, den tyska standarden för stabilitetsanalyser av slitsmurar

Permanent eller temporär slitsmur

Huruvida slitsmuren skall användas som temporär eller permanent konstruktion är en stor fråga som inte ryms inom examensarbetet. Däremot diskuteras frågan kort för att ge läsaren en bredare insyn i tekniken.

I Sverige tilläts inte slitsmurar att användas som permanenta konstruktioner när Citytunneln i Malmö byggdes. För privata beställare har de dock alltid fått användas som permanenta konstruktioner eftersom Trafikverkets bestämmelser och krav inte gäller i de fallen. Vidare diskuteras bara användandet av slitsmurar då Trafikverket är beställare. Diskussionen kring att tillåta slitsmuren som permanent konstruktion tog fart i samband med att slitsmurarna på Malmö Citytunnelprojektet blev bra. Dessutom var framtida stora projekt redan planerade i Sverige, bland annat Västlänken. Att godkänna slitsmuren som en permanent konstruktion, om den klarade beständighetskraven, skulle hållbarhetsmässigt vara en fördel. Att endast gjuta en vägg, och möjligtvis en pågjutten innervägg, som fungerar för både temporärt och permanent skede sparar tid, miljön och innebär minskade kostnader.

En slitsmur kan användas temporärt, det vill säga under byggskedet. En temporär slitsmur dimensioneras och utförs därmed för temporärt bruk. Slitsmuren kan även användas permanent, antingen för sig självt eller som en del i den permanenta konstruktionen, exempelvis genom att pågjutningar utförs. En permanent slitsmur dimensioneras och utförs så att den bibehåller sin funktion under det permanenta skedet, det vill säga trots nedbrytningsprocesser. En pågjutten innervägg, som är tunn i förhållande till slitsmurens tjocklek, utförs i de fall en slät och vattentät betongvägg önskas i det permanenta skedet. Sammanfattningsvis kan det summeras till följande tre användningsområden:

- 1) Temporärt bruk
Slitsmur tar både jord- och vattentryck i temporärt skede.
- 2) Permanent bruk
Slitsmur tar både jord- och vattentryck i både temporärt och permanent skede.
- 3) Permanent bruk med pågjuten innervägg (engelska: lining)
Slitsmur tar både jord- och vattentryck i både temporärt och permanent skede.
Den pågjutna innerväggen ökar vattentätheten i permanent skede.

Vilken typ av slitsmur som bör användas beror på många faktorer, bland annat krav och bestämmelser, grundvattentryck, acceptans av vatteninträngning och estetiskt utseende med mera (Muntlig kommunikation). Vid exempelvis högt grundvattentryck bör det alltid gjutas en innervägg som tar vattentrycket om permanent slitsmur används (Alén et al. 2006; Deix 2019).

6.1.2 Hydrogeologins och geologins påverkan på slitsens in- och utflöden

Grundvattnet följer geologin och beter sig som vatten ovan marknivå, det vill säga flödar till geologiska lågpunkter och påverkas av hinder. Alltså har grundvattnet ett högt flöde, även kallat hög gradient, om höjdkurvorna varierar kraftigt i det geologiska materialet. Omvänt gäller vid låga höjdskillnader då grundvattnet har låg gradient.

Utöver höjdskillnaderna så uppstår flöde beroende på de geologiska materialen eftersom de har olika porositet. Exempelvis tillåter grovkornigt material högre flöden på grund av sin höga porositet medan lera i princip stoppar flöden, även kallat ett impermeabelt material. Det är anledningen till att lera kan användas som tätningsmaterial.

När man utför slitsmurar vill man inte ha för stora flöden och förluster, varken ut eller in i slitsen.

Risk: hög porositet gör att stödvätskan försvinner från slitsen

Om porositeten i det geologiska materialet är alltför stor kommer stödvätskan att flöda ut från slitsen, så kallad förlust av stödvätska. Det var fallet för *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. Förlust av stödvätska är varken bra för slitsmursproduktionen, med avseende på framdrift och ekonomi med mera, eller slitsmurens slutresultat, med avseende på att mer betong brukar gå åt. I värsta fall kan schaktet kollapsa om stödvätska försvinner eftersom stödvätskan hjälper till att stabilisera slitsen. Utöver slitsmuren kan omgivningen påverkas negativt av att vattenblandad lera spolats ut i omgivande mark och grundvatten. Lera med sin tätande egenskap ska med försiktighet användas i naturen eftersom det kan få stora konsekvenser om exempelvis grundvattenflöden stannar av.

Åtgärden är förinjektering i aktuellt område eller geologiskt skikt. Om det upptäcks under utförandets gång är åtgärden också injektering. Injekteringen fyller ut de små hålrummen, det vill säga porerna, så att utflöde av stödvätska förhindras. Enligt erfarenhetsåterföringen från *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, visade det sig tydligt att injekteringen först och

främst fyllde ut övergångszonen. Det var också där problemen var som störst (Möller & Blomqvist 2008).

Risk: hög gradient på grundvattnet spolat bort materialet

Om grundvattnet har en naturligt hög gradient, finns risk för erodering av det geologiska materialet samt bortspolning av slitsens stödvätska. Det första, erodering av det geologiska materialet, är en liten risk men den kan få konsekvenser som att slitsens form förändras. Om delar av slitsväggarna eroderas kan det bland annat få konsekvenser som att stoppelementen inte hamnar där de ska. Det kan äventyra samverkan mellan slitsarna eftersom samverkan sker mellan de korrekt positionerade stoppelementen. Fyllnaden bakom stoppelementen kan även åka in i slitsen, likt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. I det fallet berodde det dock inte på höga grundvattenflöden, men principen och konsekvensen av material som åker in i slitsen är densamma. Eroderade slitsväggar kan även innebära att mer betong går åt vilket kräver mer efterarbete eftersom betongen vanligtvis måste bort för att inte inkräkta på den fortsatta anläggningens arbetsområde.

Det andra, att grundvattnets höga gradient medför att stödvätskan spolats bort, innebär förlust av stödvätska. Konsekvensen av förlust av stödvätska förklarades i stycket om risken med hög porositet.

Åtgärden för riskerna med högt grundvattenflöde är densamma som vid förlust av stödvätska, nämligen att injektera.

Slutdiskussion av 6.1.2:

Efter tekniska diskussioner 13 och 14 juni kan det generellt summeras till att grundvattenflödet och porositeten, som är starkt sammankopplade, vanligtvis är hanterbart. Injektering behöver oftast användas oavsett vilken konstruktionsmetod som används. Vad som kan nämnas är att det krävs mindre injektering vid användandet av slitsmur än exempelvis vid stålsfont. En anledning är att stålsfonten har fler fogar än slitsmuren. En annan anledning är att slitsen tätar sig själv om tillräcklig mängd finkornigt material finns i det geologiska materialet. Stödvätskan som består av det impermeabla materialet lera trycks alltid i viss mån ut längs slitsens väggar. Därmed tätas slitsen av sig självt, vilket metoden är ensamt om eftersom det är den enda metod som använder stödvätska under utförandet.

6.1.3 Geologins påverkan på schaktbarhet

Geologiskt kan sägas att det går bra att utföra slitsmuren i alla typer av geologiskt material (Tekniska diskussioner, Lunds tekniska högskola den 13–14 juni 2023). Olika typer av schakttaggregat används till olika typer av material. Gripskopa används för det material som är gripbart. Vid hårdare material kan fräs användas. Då fräs kräver större etablering och generellt är 2–3 gånger dyrare än gripskopa, vilket kan läsas mer om i avsnitt 4.3, brukar fräs undvikas om möjligt. I de fall det är möjligt att undvika fräs, det vill säga att slitsarna inte behöver gå ner i berggrunden, är det vanligt att slitsarna utförs med gripskopa tills berggrunden påträffas. Sedan jetinjekterar man i området mellan slitsbotten och bergytan. Om block finns kan man

försöka slå sönder dem genom exempelvis mejsling. På *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, användes gripskopa, fräs och mejsel.

Det som kan försvåra utförandet är när geologin varierar så pass mycket att man behöver skifta schakttaggregat. Så länge geologins variationer var kända från början innebär dock inte detta något problem eftersom man kan se till att passande aggregat med tillhörande kran och förare finns på plats. Därmed kan produktionen fortgå som planerat. Risken ligger i om variationerna inte är kända från början.

Olika konstruktioner har olika risker och möjligheter. Därmed krävs olika typer av kännedom om geologin. På projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, var geologin i stora drag känd med avseende på lagerföljd och typ av geologiskt material med mera. Detta skapade därmed inga problem under produktionen. Vad som däremot skiljde sig från förfrågningsunderlaget eller var okänt var: hårdheten på berget och blockförekomsten.

Risk: hårdare material och större variation än väntat

Det är ett tekniskt lösbart problem om gripbart material angavs och planerades för, och det under utförandet visar sig att materialet är hårdare. Då kan man som nämndes ovan använda ett annan typ av schakttaggregat.

Risken när ytterligare schakttaggregat behövs, exempelvis fräs, är att produktionen saktas ner eller avstannar med förseningar och ökade kostnader som konsekvens. En av anledningarna är att man måste invänta leverans av ny kran med fräsaggregat och förare. Många bolag äger inte aggregaten, eller har få på lager, vilket kan försvåra och fördröja leveransen ytterligare. När fräs används tillkommer också en utökad etablering för att bland annat hantera kaxet och den extra stödvätskan som krävs. Se tidigare kapitel för mer information.

Åtgärden är att i tidigt skede utföra rätt typ av geotekniska undersökningar, se nedan.

Risk: okänd blockförekomst i marken

Vad som är viktigt med slitsmursmetoden är att frekvensen av stora block och blockens storlek i jordmaterialet måste vara känd. Om det inte nämns antas jordmaterialet vara gripbart. Om det sedan under schaktning förekommer större block som är så pass stora att man inte kan schakta upp dem, får det negativa konsekvenser. Problemet kan antingen ligga i att gripskopans käftar inte når om, eller för att öppningen mellan styrväggarna är för litet för att ta upp blocket igenom.

Åtgärden kan vara att använda mejsling för att slå sönder blocken till mindre schaktbara bitar. Det var fallet i *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö. En annan åtgärd kan vara att förborra i marken för att på så sätt sönderdela blocken. Alltså är det ett tekniskt lösbart problem, men att upptäcka att mejsel krävs under utförandeskedet har samma konsekvenser som förklarades ovan.

Mejslingen ger dock upphov till dynamiska effekter i schakten vilket man måste ta hänsyn till.

Den långsiktiga åtgärden är även här att rätt typ av geotekniska undersökningar krävs.

Åtgärd: Geotekniska undersökningar

Kraven på vad beställaren ska tillhandahålla finns beskrivna i utförandekoden, kapitel 5. Vad som är viktigt att understryka är att fokus inte ska ligga på *att* man undersöker utan *vad* man undersöker. Med andra ord måste man veta vad man letar efter. I projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, var problemet likt tidigare beskrivet att berget var hårdare och större block förekom i större utsträckning än angivit. Under de tekniska diskussionerna som ägde rum i Lund den 13 och 14 juni diskuterades att fallet i Malmö Citytunnelprojektet inte var unikt, utan ett relativt vanligt problem.

Vad som är specifikt viktigt att ange för slitsmursentreprenören är i vilken utsträckning hårt berg förekommer samt om större block förekommer i marken. Om block förekommer krävs information från beställaren om: dess storlek, hur ofta och på vilken nivå de förekommer.

Ingen geoteknisk undersökningsmetod ger en exakt spegling av verkligheten. De flesta ger en modell av verkligheten. Detta beror både på att alla undersökningsmetoder har brister samt att det faktum att man mäter, det vill säga stör materialet, påverkar materialet och dess värden. Olika geotekniska undersökningsmetoder mäter olika parametrar och lämpar sig olika bra för olika geologier.

Beroende på undersökningsmetod sker mätning genom att en mer eller mindre solid krona sätts på en stång med olika dimension och utformning. Krona med stång trycks, skruvas, borrar, slås och roteras ner i marken medan värden mäts. Alltså går de flesta undersökningarna ut på att mäta värden genom att pressas in i eller krossa det geologiska materialet. Med de metoderna kan man enligt svenska geotekniska föreningen (SGF) via fältkommittén få ut en grov uppskattning på exempelvis bergytans nivå (jord-bergsondering), portryck i lösa jordar (CPTU), deformations- och hållfasthetsegenskaper (hejarsondering) (Fältkommittén för SGF 2018). Vad man inte får ut är information om sprickor, blockförekomst och den varierande hårdheten på berget. Det kan man i större utsträckning med kärnborring.

Inte heller kärnprovtagning speglar den exakta verkligheten, men den ger en fingervisning, vilket exempelvis inte jord-bergsondering ger. Kärnprovtagningar är kostsamt att utföra men konsekvensen av uteblivna kärnprover är också kostsam.

6.1.4 Underhåll

Endast permanenta konstruktioner kräver underhåll. Likt tidigare nämnt tilläts inte slitsmurar att användas som permanenta konstruktioner i Sverige när *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, byggdes. Det är cirka 20 år sedan. Sedan dess har ingen permanent slitsmur färdigställts i offentligt sammanhang. Därmed har ingen slitsmur behövt underhållas vilket i sin tur betyder att ingen uppföljningsinformation om underhåll finns.

Enligt Scholz som har erfarenhet av många slitsmurar runt om i världen, både som konstruktör och under produktion, särskiljer inte slitsmurens underhållsbehov från andra konstruktioners underhållsbehov (Christian Scholz, 9 maj 2023).

6.2 Organisatoriska faktorer

Under de tekniska diskussionerna som hölls i Lund den 13–14 juni 2023 diskuterades organisatoriska faktorerens inverkan på slutresultatet. För att uppnå ett bra slutresultat, oavsett konstruktion, krävs:

- kompetens i form av erfarenhet och kunskap
- god planering
- god kvalitetskontroll från både utförandeentreprenör och beställare
- god kommunikation
- en fungerande organisation
- jobba mot samma mål

En erfaren och kunnig utförarentreprenör är viktigt, men minst lika viktigt är att övriga inblandade, så som beställare, huvudentreprenör, leverantörer, projektörer och konstruktörer med mera, är kompetenta. Kompetens fås genom erfarenhet och att kunskap om metoden sprids, genom exempelvis undervisning, litteratur, lära av varandra och att metoden används.

När tillräcklig kompetens finns kan väl genomtänkta specifikationer och detaljerade kontrollprogram utföras. Ordentligt utförda specifikationer leder till bättre slutresultat, både i projekterings- och produktions skedet. Väl genomtänkta och detaljerade kontrollprogram går att efterfölja på ett bra sätt vilket ökar chanserna för ett bra slutresultat.

Det finns risker med alla konstruktioner och metoder. Så även med slitsmuren. För att hantera riskerna krävs en fungerande organisation och god kommunikation. Det kvittar hur bra tekniken och de tekniska lösningarna är om organisationen och kommunikationen fungerar dåligt. Det är viktigt att samtliga inblandade jobbar mot samma mål.

När det kommer till slitsmuren, jämfört med exempelvis stålspont, är ovanstående sex punkter ännu viktigare eftersom den svenska branschen saknar vanan, och i viss utsträckning även kompetensen.

När stålspont används har samtliga inblandade erfarenhet att luta sig tillbaka på. Man vet av erfarenhet hur den ska dimensioneras, projekteras och installeras. Man vet vilka svårigheter och vilket slutresultat som kan förväntas. Samtliga inblandade, så som beställare, huvudentreprenör, utförarentreprenör, leverantörer, projektörer och konstruktörer, har vanan inne och är tillräckligt kompetenta inom metoden för att se risker och hantera dem. Den vanan finns inte i lika stor utsträckning när det kommer till slitsmuren, vilket inte är konstigt eftersom tekniken bara har använts relativt få gånger i Sverige.

6.3 Ekonomi

När det kommer till den ekonomiska biten är det inget som studeras i denna rapport utan berörs bara kort. Först och främst bör nämnas att det i vissa fall inte är möjligt att använda någon annan metod än slitsmursmetoden. Det kan exempelvis bero på att ett stort djup krävs eller att man anlägger väldigt nära andra byggnader. I de flesta fall är dock flera metodval möjliga. I de fallen bör en projektspecifik kalkyl göras eftersom förutsättningarna för varje projekt skiljer sig åt. Det är svårt att jämföra schablonsiffror över olika metoders kostnad. Det beror på att själva utförandet, som en isolerad post, inte alltid speglar den slutgiltiga totalkostnaden. För att nämna ett exempel så påverkar vald teknik hur många stagnivåer som krävs. Flera stagnivåer påverkar den fortsatta framdriften väldigt mycket, men det är inget som avspeglas i schablonkostnaden för konstruktionerna, se avsnitt 2.4.2. Alltså är det den slutgiltiga totalkostnaden som bör jämföras vid val av metod.

I projekt *E101 Malmö C nedre*, Citytunneln i Malmö, har det konstaterats i erfarenhetsåterföring att själva utförandet av slitsmuren var dyrare än stödväggarna som utfördes med stålspons och bergsförstärkning (sprutbetong med förstärkning). Däremot var totalkostnaden för respektive stödvägg samma. Med slitsmursmetoden gjordes kostnadsbesparingar i form av:

- mindre grundvattensänkning
- minskat behov av injektering
- effektivare schakt och återfyllning (se avsnitt 2.4.1)

Utöver ovanstående saktades framdriften ned eftersom bergschakten karterades etappvis med 1,5 m höga pallar. Karteringen gjordes etappvis för att avgöra vilken typ och hur mycket bergsförstärkning som krävdes för att stabilisera berget (Möller & Blomqvist 2008).

6.4 En god arbetsmetod

En god arbetsmetod diskuterades på de tekniska diskussionsmötena den 13 och 14 juni. Tillsammans med tidigare nämnd information kan följande steg ses som en kortfattad sammanfattning och fingervisning av vilka steg som ökar chanserna för ett gott slutresultat.

1. Överenskommelse om produkt

Beställare, konstruktör och utförandeentreprenör ska vara överens om vilken produkt som efterfrågas. Exempel:

- Ska slitsmuren vara permanent eller temporär?
- I de fall den är permanent: ska en innervägg gjutas på insidan för ökad vattentätthet?

2. Utredningsskede

Utredningen av markförhållandena är viktig. Ju bättre förhållandena är specificerade desto bättre blir processen och slitsmurens slutresultat. Vad som bör specificeras av beställaren hittas i kapitel 5.2 i den svenska standarden SS-EN 1538:2010+A1:2015. Några som kan nämnas är:

- Porositet
- Grundvattenytans nivå
- Marknivå över arbetsområdet
- Blockighet: frekvens och storlek
- Berg: ytans nivå, hårdhet på berg och dess variation med mera
- Kemisk sammansättning av grundvatten, jord och berg

3. Planering, projektering och dimensionering

Noggranna riskanalyser bör göras. Här krävs kunskap, erfarenhet och kommunikation enligt avsnitt 6.2. Det ska finnas åtgärder till varje risk så att samtliga inblandade parter vet vad som ska göras om någon av riskerna inträffar.

Under denna fas behöver produktionsmässiga frågor tas omhand om för att utförandet i senare skede ska flyta på som planerat. Exempelvis behöver stödvätskan och schaktmassorna från slitsarna tas omhand om. Schaktmassorna består av en blandning av geologiskt material och stödvätska.

Det är viktigt att slitsmuren dimensioneras och projekteras så att den är byggbar. Exempelvis måste betongen kunna flöda smidigt i slitsen under gjutningen. Det ställer krav på att armeringskorgen är väl genomtänkt eftersom den hindrar flödet. Exempel på detta är att inte för många lager av armering används, utan att man i stället använder grövre dimensioner på armeringsjärnen.

Armeringskorgen måste inte bara dimensioneras för användningsskedet, det vill säga temporärt och eventuellt permanent bruk. Den måste också dimensioneras så att den klarar lyftet, se avsnitt 4.6.

4. Test av stödvätska och provpanelsinstallation

Prover av grundvattnet bör tas och analyseras. Innehållet i vattnet påverkar exempelvis vilken typ av lera som fungerar eller vilken typ av exponeringsklass betongen behöver ha. Det är en viktig process som inte bör bortprioriteras.

Fullskaletest är inget krav såvida inte beställaren specifikt skriver in det som ett krav. Däremot bör fullskaletest utföras. Att göra fullskaletest i god tid, runt 6 månader, före utförandet drar i gång minimerar riskerna i senare skede. Det är som alltid bättre att upptäcka eventuella svårigheter såväl som vad som fungerar innan det börjar kosta både tid och pengar. Upptäcks det i god tid hinner man justera.

Ibland görs testpanelerna som en del av den riktiga väggen. Det är bättre att utföra testpanelerna utanför den riktiga väggen, men om det inte är möjligt är det bättre att utföra dem som en del av väggen än inte alls.

5. Utförande av slitsmur med kvalitetskontroller, god dialog och gott samarbete

Under utförandet bör kvalitetskontroller utföras enligt den svenska standarden SS-EN 1538:2010+A1:2015. Kontroller bör även utföras av beställare och huvudentreprenör.

Det allra bästa är om inga störningar uppstår under slitsmursarbetet, det vill säga att slitsmursentreprenören har arbetsområdet helt för sig självt. Speciellt under gjutningen. Gjutningen får inte stoppas eftersom hela slitsen måste gjutas i ett svep. Här är kommunikationen viktig så att alla på arbetsplatsen är införstådda i processen. Även betongfabriken behöver vara införstådd i processen.

I många fall utför slitsmursentreprenören tillhörande jobb efter färdigställd slitsmur, exempelvis förankring. På så sätt har entreprenören också möjlighet att stanna kvar på arbetsområdet under framschaktningen av slitsmurarna. Därmed finns entreprenören redo på plats om åtgärder, som lagning, krävs.

Då erfarenhet och kunskap om processen att utföra en slitsmur är avgörande för slutresultatet, bör slitsmursentreprenören inte upphandlas på lägsta pris. Andra kriterier måste vägas in.

7 Slutsatser

Slitsmuren är en robust konstruktion som erbjuder möjligheter som ingen annan grundläggningsmetod kan erbjuda, såsom låg omgivningspåverkan och stort djup. Det är anledningen till att tekniken har utvecklats och spridits över världen sedan mitten av 1900-talet.

Vilken konstruktion som bör användas i ett projekt beror på förutsättningarna och kraven. Alla tekniker medför olika möjligheter och begränsningar. Därmed lämpar de sig för olika förutsättningar. Det innebär också att ju fler tekniker vi har att välja mellan, desto bättre blir tillämpningen. Vanligtvis nyttjas flera tekniker inom samma projekt eftersom förutsättningarna inom projektet ofta varierar. Teknikerna med stålspons, sekantpålar och slitsmur har jämförts. Den summerade slutsatsen om teknikernas möjligheter och begränsningar överskådliggörs i Tabell 2 avsnitt 2.4.4. Utöver teknikernas tekniska faktorer bör hänsyn tas till hela produktionskedjan och dess ekonomiska inverkan, såväl ökade som minskade kostnader, vid valet av teknik. Endast då kan teknikerna jämföras. Alltså bör följande aspekter vägas in:

- Tekniska
 - Såsom styvhet, behov av injektering, omgivningspåverkan och åtgärder (ex. bullerskydd)
- Produktionsmässiga
 - Såsom antal stagnivåer och dess påverkan på framdriften, möjligheter till upplag och leveranser
- Ekonomiska
 - Såsom grundvatten- och masshantering, maskin- och etableringskostnader och kostnaden för störd framdrift beroende på antal stagnivåer

Både tekniska och organisatoriska faktorer spelar roll för slutresultatet. En fungerande organisation optimerar slutresultatet medan bristfällig kommunikation, förståelse, planering, kontroll och uppföljning från inblandade parter innebär risker. Det är därmed av största vikt att kunskap om slitsmurstekniken på en teknisk nivå görs lättillgänglig för samtliga parter i alla faser.

Projektspecifika slutsatser av E101 Malmö C nedre, Citytunneln i Malmö

Anledningarna till att slitsmur användes i stället för andra tekniker:

- Låg omgivningspåverkan
- Stort anläggningsdjup (24 m)

De största svårigheterna i projektet var direkt kopplade till geologin och hydrogeologin:

- Stor fraktionsskillnad i geologin med stora block. Innebar försvårade schaktarbeten.
- Kraftigt vittrad geologi. Innebar hög hydraulisk konduktivitet.
- Stor variation på bergets hårdhet (hårdaste berget var H5 och mjukaste berget var H1)

Svårigheterna i projektet är potentiella risker för framtida projekt. Så länge rätt parametrar om geo- och hydrogeologin är kända är det tekniskt möjligt att utföra slitsmuren. Med rätt

parametrar avses i fallstudien: frekvens, variation, hårdhet och storlek på block och berglager. Vad som avses med rätt parametrar generellt är projektspecifikt och beror på markförhållandet och vald teknik.

Ytterligare slutsats från fallstudien är att slitsmuren inte innebar större totalkostnad än stålspons i kombination med sprutbetong.

Vidare studier

Erfarenhet, utredning, utvärdering och uppföljning av svenska projekt:

- Pågående projekt bör noggrant följas upp med:
 - Provning av uttagna slitsmurskärnprover, i de fall det är möjligt
 - Generell erfarenhetsåterföring
 - Noggrant följa underhållsarbetet, i de fall det är aktuellt
 - Ekonomisk utvärdering av metoden, gärna jämfört med andra använda metoder
 - Utvärdera hur geologin och hydrogeologin påverkade slitsmursutförandet
- Utvärdera hur geologin och hydrogeologin påverkade övriga avslutade projekt
- Utvärdera varför slitsmurskonstruktionen valdes i övriga svenska projekt

Generell vidareutveckling av kunskap om tekniken:

- Mer forskning på slitsmursområdet
 - Såsom klimatpåverkan i förhållande till andra grundläggningsalternativ
- Svensk litteratur bör produceras
- Lära ut tekniken under utbildningen på svenska tekniska högskolor

8 Referenser

Alén, C., Lindvall, A., Johansson, M., Magnusson, J. & Norén, C. (2006). *Slitsmurar som permanenta konstruktioner*. SBUF (Utvecklingsprojekt 11603 och 11796).

Brantmark, J., Damgaard, P., Kolbjørnsen, C., Schraml, P., Berg, Ö., & Abel, F. (2008). Citytunneln – Ett tunnelprojekt i Malmö. I *Bergteknik (BK-dagen) 2008*. Svenska Bergteknikföreningen

Deep Foundation Institute (DFI). (u.å.). *The history of diaphragm wall panel joints*. <http://www.ccmjssystem.co.uk/background-and-context/#:~:text=The%20Italian%20company%20ICOS%2C%20the,triangle%20on%20the%20concrete%20face> [2023-03-21]

Deix, J.-D. (2019). *Schlitzwände – Richtlinie*. Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), s. 41

DIN 4126:2013–09. *Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden*. Deutsches Institut für Normung (DIN).

European Federation of Foundation Contractors (EFFC) & Deep Foundation Institute (DFI). (2018). *Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations*.

Fältkommittén för Svenska Geotekniska Föreningen (SGF). (2018). *Instruktionsfilmer geotekniska fältundersökningsmetoder*. <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=4721> [2023- 07-19]

Hercules (u.å.). *Jetinjektering – Metod för bland annat tätning och grundförstärkning*. <https://hercules.se/grundlaggning/jordforstarkning/jetinjektering/> [2023-09-05]

Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C

Puller, M. (2003). *Deep excavations: A practical manual*. 2 uppl., ThomasTelford

Scholz, C. & Linder, W.-R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. *I Grundläggningdagen 2007*. SGF, Stockholm, Sverige 8 mars 2007, ss. 147–160.

Soilmec (2016a). *Cased Augered Piles - technology* [broschyr].
<https://www.soilmec.com/DownloadFile.aspx?id=557#:~:text=CAP%20Cased%20Augered%20Piles%20is,cast%20in%20place%20piles%20type>

Soilmec (u.å.). *Cased augered/Secant piles*
<https://www.soilmec.com/en/casedaugeredsecantpiles> [2023-07-11]

Soilmec (2016b). *Diaphragm walls - technology* [broschyr].
<https://www.soilmec.com/DownloadFile.aspx?id=558>

SS-EN 1538:2010+A1:2015. Execution of special geotechnical work – Diaphragm walls. Svenska institutet för standarder (SIS).

SS-EN 1536:2010+A1:2015. *Execution of special geotechnical work – Bored piles*. Svenska institutet för standarder (SIS).

Stanley, M., Sayavong, S., Hard, D., Gatward, J. & Puller, D. (2014). Design and construction of the Thames Water Lee Tunnel shafts, London. *DFI – EFFF International Conference on Piling and Deep Foundations*. Stockholm, Sverige 2014.

van Tol, A. -F., Spruit, R., van Dalen, J. H. & Admiraal, B. (2014). Diaphragm walls, recent developments to improve reliability. *DFI – EFFF International Conference on Piling and Deep Foundations*. Stockholm, Sverige 2014.

Muntliga referenser

Tekniska diskussioner

Tekniska diskussioner hölls i Lund den 13 och 14 juni 2023. Diskussionerna hölls mellan:

- Christian Scholz, Prof. Dr. -Ing. Bremen Universitet och S&C Consult GmbH
- Anne Gordon, Ph.D., Eur.Ing., Senior Consultant Civil Works, Ramböll Sverige
- Jonas Magnusson, Teknisk Doktor, Ledande teknisk specialist
- Per Lindh, adjungerad lektor vid Lunds tekniska högskola och senior specialist på Trafikverket

Muntlig kommunikation

Muntlig kommunikation med handledare under våren och sommaren 2023

- Anne Gordon, Ph.D., Eur.Ing., Senior Consultant Civil Works, Ramböll Sverige
- Jonas Magnusson, Teknisk Doktor, Ledande teknisk specialist
- Per Lindh, adjungerad lektor vid Lunds tekniska högskola och senior specialist på Trafikverket

Personlig kommunikation via Zoom med Prof. Dr. -Ing. Christian Scholz, Bremen Universitet och S&C Consult GmbH har ägt rum:

- Onsdag 26 april
- Tisdag 9 maj
- Måndag 31 juli

Personlig kommunikation vid studiebesök den 20 juni 2023 med Colin Qvarnström, Biträdande Blockchef för slitsmursarbeten, NCC, på projekt *E02 Centralen*, Västlänken, Göteborg.

Figurer

- Figur 1 Scholz, C. (2020). *Pervious retaining walls* [opublicerat material]
- Figur 2 Scholz, C. (2020). *Impervious retaining walls* [opublicerat material]
- Figur 4 Scholz, C. (u.å.). *Secant pile wall* [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 5 Scholz, C. (u.å.). *Secant pile wall* [opublicerat material]
- Figur 6 Åhnberg, H. (2004). *Sekantpålar som stödkonstruktion: Litteraturstudie*. Statens geotekniska institut, Varia 544, Linköping
- Figur 7 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 10 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 11 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 17 Scholz, C. (u.å.). *Construction sequence – Installation of RFT-cage (standard sections)* [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 21 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 26
- Figur 22 Alén, C., Lindvall, A., Johansson, M., Magnusson, J. & Norén, C. (2006). *Slitsmurar som permanenta konstruktioner*. SBUF (Utvecklingsprojekt 11603 och 11796).
- Figur 28 Scholz, C. (2020). *Clearance of alignment and construction of guide walls* [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 29 Scholz, C. (2020). *Clearance of alignment and construction of guide walls* [opublicerat material]
- Figur 31 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 32 Scholz, C. (2020). *Clearance of alignment and construction of guide walls* [opublicerat material]
- Figur 38 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 39 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 40 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 42 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]

- Figur 44 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 48 Odepark Larsson, M. (2022). *Presentationsmaterial* [Fotografi] [Internt material]
- Figur 53 Scholz, C. (u.å.). [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 56 Scholz, C. (u.å.). *Construction sequence – Concreting by Tremie method* [fotografi] [opublicerat material]
- Figur 57 Odepark Larsson, M. (2022). *Presentationsmaterial* [Fotografi] [Internt material]
- Figur 65 Trafikverket (2022). *Citytunneln*
<https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/sveriges-jarnvagsnat/citytunneln/> [2023-05-15]
- Figur 66 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007, s. 147.
- Figur 67 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 26
- Figur 68 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007, s. 147.
- Figur 69 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). [Fotografi] Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007
- Figur 70 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). [Fotografi] *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C
- Figur 71 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007, s. 147.
- Figur 72 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007
- Figur 73 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007

- Figur 74 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). [Fotografi] *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 12
- Figur 75 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). [Fotografi] Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007
- Figur 76 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). [Fotografi] *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 31
- Figur 77 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 13
- Figur 78 Scholz, C. & Linder, W. -R. (2007). Excavation pits for contract E101: City tunnel Malmö, Central station. I *Grundläggningdagen 2007*. Stockholm, Sverige 8 mars 2007
- Figur 79 Möller, H. & Blomqvist, J. (2008). *Erfarenhetsåterföring Geoteknik: Erfarenheter från produktion och provning vad gäller schaktarbeten, temporära konstruktioner samt permanenta dragstag*. Citytunneln – Delprojekt Malmö C, s. 13
- Figur 82 Lindh, P. (2006). [fotografi] [opublicerat material]