



CHALMERS



Lärdomar från Nicoll Highway

En litteraturstudie om orsaker till kollapsen vid Nicoll Highway och dess konsekvenser

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

KAJSA ALTE
KHODOR QARAUSH
NATALIE SMILEVSKA

WILLIAM HÖGEFJORD KRISTIANSSON
HANAN SABRI
EMIL THEODORSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022

Lärdomar från Nicoll Highway

En litteraturstudie om orsaker till kollapsen vid Nicoll Highway och dess konsekvenser

Kajsa Alte

William Högefjord Kristiansson

Khodor Qaraoush

Hanan Sabri

Natalie Smilevska

Emil Theodorsson



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

Lärdomar från Nicoll Highway

En litteraturstudie om orsaker till kollapsen vid Nicoll Highway och dess konsekvenser

© KAJSA ALTE, WILLIAM HÖGEFJORD KRISTIANSSON, KHODOR QARAOUSH, HANAN SABRI, NATALIE SMILEVSKA, EMIL THEODORSSON, 2022.

Handledare: Johannes Tornborg, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Examinator: Minna Karstunen, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Kandidatarbete 2022

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Framsida: Kollapsen vid Nicoll highway Committee of Inquiry. (2005). *Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004*. Singapore, Ministry of Manpower

Typeset in L^AT_EX

Tryckt av Chalmers Reproservice

Göteborg, Sverige 2022

Lessons learnt from Nicoll Highway - A literature review about the causes for collapse of Nicoll Highway and its consequences

KAJSA ALTE, WILLIAM HÖGEFJORD KRISTIANSSON, KHODOR QARAOUSH, HANAN SABRI, NATALIE SMILEVSKA, EMIL THEODORSSON.

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Geology and Geotechnics

Chalmers University of Technology

Abstract

When constructing in soil, as in an excavation, the understanding of how the soil acts and awareness of the consequences are vital. A soil volume with 1-2 metres of depth is equivalent to 2-3 metric tonnes which can cause severe bodily injuries, not the least of which is the risk of suffocation. In the year 2004, a collapse of an excavation occurred due to the extension of a new tunnel for the railway system Mass Rapid Transit (MRT) in Singapore. The collapse was located close to Nicoll Highway and brought dire consequences, not only for the four people who tragically lost their lives, but also for the immediate surroundings and the construction industry as a whole. The purpose of this literature study is to clarify and gain a deeper understanding of the causes behind the collapse, and how similar accidents can be avoided in the future. The extension of the MRT included a 30 meter deep excavation. In the design phase, a calculation model was used incorrectly which overestimated the shear strength properties of the clay. The understanding of the background theory of the model was inadequate and the manual was misleading. This caused an underestimation of the deflections and bending moments in the excavation walls, and the necessary capacity of the substructure. During the construction process, inadequate follow-ups were made to the worrying movements in the walls and the bottom of the excavation. There were also some construction parts that were mounted in an inadequate way, which caused disadvantages in the force transfer between constructional elements. This eventually led to the collapse of an 80 metre long section of the excavation and the death of four people, where one of the bodies never was found. The consequences of the collapse were of great cost to society: the power went out for about 15 000 people and 700 businesses, and Nicoll Highway was closed for seven months. There were a number of points made in the afterstudies that brought attention to the large inadequacies in the safety culture and communication, not only on the working site, but also in the organisation of the project. This is something that has to be improved and taken into account to reduce the risk of similar accidents happening in the construction industry in the future.

Keywords: Nicoll Highway, Singapore, Failure, Retaining wall, Deep excavation.

Lärdomar från Nicoll Highway - En litteraturstudie om orsaker till kollapsen vid Nicoll Highway och dess konsekvenser

KAJSA ALTE, WILLIAM HÖGEFJORD KRISTIANSSON, KHODOR QARAOUSH, HANAN SABRI, NATALIE SMILEVSKA, EMIL THEODORSSON.

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Vid byggnation i jordmassor, så som schakt, krävs stor förståelse för hur jorden fungerar och medvetenheten om konsekvenserna är viktig. Jordmassor på 1-2 meters djup motsvarar 2-3 ton vilket kan leda till att stora kroppsliga skador orsakas, inte minst risken för att kvävas. År 2004 kollapsade ett schakt i samband med utbyggnationen av en ny tunnel för järnvägssystemet Mass Rapid Transit (MRT) i Singapore. Kollapsen inträffade vid Nicoll Highway där ett 30 meter djupt schakt rasade in. Detta förde med sig stora konsekvenser, inte minst för de fyra personer som omkom, men också för omgivningen och byggbranschen i stort. Syftet med denna litteraturstudie är att klargöra och få en djupare förståelse i vad som orsakade kollapsen av Nicoll Highway samt för att undvika liknande olycksfall i framtiden. I dimensioneringsfasen av MRT användes en beräkningsmodell i ett program på ett felaktigt sätt, vilket innebar att jordlagrens skjuvhållfasthetsegenskaper överskattades. Förståelsen för bakgrundteorin till modellen var bristande och manualen till programmet var missvisande. Detta ledde till en underskattning av schaktväggarnas/stödkonstruktionens utböjningar, böjmoment och erforderliga kapacitet. Under projektets gång uppmättes oroande mätvärden av rörelser i marken/konstruktionen, men inga adekvata åtgärder vidtogs. Det var även ett flertal delar av stödkonstruktionen som monterades på ett felaktigt sätt, vilket var ogynnsamt för överförandet av krafter mellan de ingående delarna. Detta resulterade så småningom i att en 80 meter lång sektion av utgrävningen kollapsade, och fyra personer omkom, varav en person aldrig hittades. Konsekvenserna av kollapsen ledde till stora samhällskostnader: 15 000 människor samt 700 företag blev utan ström och den närbelägna Nicoll Highway stängdes ner i sju månader. Flera punkter i efterstudierna pekar på allvarliga brister i säkerhetskulturen under projektets gång samt i kommunikationen mellan olika parter under byggnationen och i organisationen. Detta är något som måste förbättras och hållas i åtanke för att minska sannolikheten för olyckor i byggbranschen i framtiden.

Nyckelord: Nicoll Highway, Singapore, Kollaps, Stödmur, Djupa schakt.

Förord

Detta kandidatarbete har utförts på Chalmers Tekniska Högskola under Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik, under Avdelningen för Geologi och Geoteknik. Vi som skrivit detta arbete studerar Samhällsbyggnadsteknik, civilingenjör.

Innehållet i detta arbete fångade samtliga av våra intressen tidigare i vår. Att få en bättre förståelse för vad som orsakar en olycka som denna samt större kunskap om djupa schakt var ett mål vi haft med oss från början. Upplägget på arbetet har innefattat en dagbok och loggbok där antal timmar och en kommentar på utfört arbete noterats för varje person. Detta för att arbetet ska kunna fördelas jämnt.

Detta arbetet hade inte vart möjligt utan vår handledare och examinator, Johannes Tornborg och Minna Karstunen, som ställt upp med värdefull vägledning genom hela processen. Tack för er expertis och tid.

Kajsa Alte, William Högefjord Kristiansson, Khodor Qaraoush, Hanan Sabri,
Natalie Smilevska, Emil Theodorsson, Göteborg, Juni 2022.

Beteckningar

Nedan följer ett antal beteckningar med tillhörande beskrivning som använts genom arbetet.

B	Schaktbredd [m]
D	Spontlängd [m]
H	Schaktdjup [m]
L	Schaktlängd [m]
N_c	Bärighetsfaktor [-]
S_r	Vattenmättnadsgrad [%]
V_w	Porvattenvolym [m^3]
V_p	Porvolym [m^3]
c	Kohesion [kPa]
d	Djup på schaktvägg under schaktbotten [m]
g	Tyngdacceleration [m/s^2]
p	Last innanför spont [kPa]
p_a	Aktivt jordtryck [kPa]
p_p	Passivt jordtryck [kPa]
p_v	Vattentryck [kPa]
q	Last [kPa]
u	Portryck [kPa]
z_i	Lagertjocklek [m]
γ_i	Tunghet [N/m^3]
ρ	Densitet [kg/m^3]
$\sigma_1 = \sigma_0$	Vertikal totalspänning [kPa]
σ_2	Horisontell totalspänning [kPa]
σ_3	Horisontell totalspänning [kPa]

σ'_1	Vertikal effektivspänning [kPa]
σ'_2	Horisontell effektivspänning [kPa]
σ'_3	Horisontell effektivspänning [kPa]
σ'_c	Förkonsolideringstryck [kPa]
τ_{fu}	Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]
ϕ'	Inre friktionsvinkel [°]

Innehåll

Förord	xi
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Introduktion	1
1.1 Metod	2
1.2 Avgränsning	2
2 Bakgrund	3
2.1 Jordegenskaper	3
2.1.1 Övergripande geologi och stratigrafi för Singapore	3
2.1.2 Mättnadsgrad och permeabilitet	5
2.1.3 Dränerade och odränerade tillstånd	5
2.1.4 Skjuvhållfasthet	6
2.2 Deformationsegenskaper	10
2.2.1 Deformationstyper	10
2.2.2 Konsolidering	13
2.3 Jordtryck	13
2.3.1 Passivt och aktivt jordtryck	14
2.3.2 Bottenuppressning	16
2.4 Stödkonstruktioner	18
3 Jordlagren vid olycksplatsen	21
4 Konstruktionen	25
4.1 Slitsmur	25
4.2 Stämp	26
4.3 Jetinjektering	26
5 Kollapsens händelseförlopp	29
6 Dimensioneringen av stödkonstruktionen	31
7 Brister vid genomförandet	35
7.1 Stödkonstruktionen	35
7.2 Övervakning av utgrävningen	37

7.3	Säkerhetskultur	38
8	Konsekvenser efter kollapsen	39
8.1	Samhälleliga kostnader	39
9	Diskussion	41
9.1	Orsakerna till kollapsen och möjliga åtgärder	41
9.2	Djupa kontra grunda schakt	42
9.3	Säkerhetskultur och riskhantering	43
9.4	Vem bär ansvaret?	45
9.5	Värdet på ett människoliv	47
9.6	Förebyggande olyckshantering	48
10	Slutsats	51

Figurer

1.1	Karta över Singapore	2
2.1	Karta över geologi i Singapore	4
2.2	Spänningsmodell	6
2.3	Kornstruktursmodell	7
2.4	Mohr-Coulomb's brottkriterium	8
2.5	Direkt skjuvförsök	9
2.6	DSS	10
2.7	Triaxialförsök	11
2.8	Deformationstyper	11
2.9	Inverkan på deformationerna av spänningshistorien	12
2.10	Jordtryck	14
2.11	Passivt och aktivt jordtryck	14
2.12	Jordtrycksdiagram	16
2.13	Bottenuptryckning	17
2.14	Bärighetsfaktor	17
2.15	Slitsmur	19
2.16	Jetinjektering	20
2.17	Stag och stämp	20
3.1	Typisk jordlagerföljd	23
4.1	Planvy på konstruktionen	25
4.2	Stämp, hammarband och strävor	26
4.3	Tvärsektion av schakt	27
5.1	Kollapsen vid Nicoll Highway	30
6.1	Utböjningen för slitsmurarna	32
7.1	Djupet på slitsmurarna	35
7.2	Foto av livavstyvning och UPE-balk	36
7.3	Ritning över livavstyvning och UPE-balk	37
8.1	Planvy över den gamla och nya MRT-rutten	40
9.1	Säkerhetsutrustnings påverkan på mängden olyckor	44
9.2	VSL för olika länder	48

Tabeller

3.1	Parametrar för marin lera	22
3.2	Parametrar för den alluviala komponenten	22

1

Introduktion

Det krävs erfarenhet och kunskap för att på ett säkert sätt schakta i jord (Lundström m. fl., 2015). Det är risktagande och varje år inträffar olyckor kopplat till schaktarbeten. Det är viktigt att anpassa schaktarbetet till rådande förhållanden med hög säkerhetsmarginal, eftersom det annars kan ske ras i schaktet eller brott i stödkonstruktionen. Det som kan ställa till med problem är jordlagrens sammansättning och jordens vattenförhållanden. På en byggarbetsplats finns det en tendens att riskerna underskattas, brister inte upptäcks eller att inga åtgärder görs åt bristerna. Om en människa hamnar under jordmassor från 1-2 meters djup motsvarar det att få 2-3 ton över sig. Detta kan orsaka kroppsliga skador eller kväva en människa.

År 2004 pågick byggnationen av en ny järnväg i södra delen av Singapore, se figur 1.1. Järnvägen beställdes av Singapores transportmyndighet Land Transport Authority (LTA), där Nishimatsu Construction Company (NCC) var entreprenör (COI, 2005). Projektet innefattade en 110m lång tunnel vid Nicoll Highway åt Singapores Mass Rapid Transit (MRT), en järnväg som cirkulerar runt Singapores stadskärna. Den 20 april 2004, under den pågående byggnationen av järnvägen, skedde en kollaps där motorvägen Nicoll Highway rasade in mot MRT-schaktet. Fyra personer omkom och ytterligare tre personer skadades allvarligt (Knappett & Craig, 2020, s. 501). Under sju månader var Nicoll Highway avstängd, vilket hade stor påverkan på omgivningen. Syftet med denna rapport är att redogöra orsakerna till kollapsen, vilka lärdomar som kom från den och hur arbete kan genomföras för att liknade olyckor inte ska upprepas. Rapporten inleds med en övergripande bakgrund om jordegenskaper, deformationsegenskaper, jordtryck och stödkonstruktioner. Sedan redogörs jordlagerföljden vid Nicoll Highway och vilka konstruktionstyper som användes vid schaktet. Vidare redogörs felen i dimensioneringen och hur utförandet av byggnationen medverkade till kollapsen. Slutligen, innan diskussionen, tas konsekvenserna av kollapsen upp.

Rapporten utgår från följande frågeställning.

- Vad var orsakerna till kollapsen?
- Vad var konsekvenserna av kollapsen?
- Vems ansvar var det att kollapsen skedde?
- Hur hade kollapsen kunnat motverkas?

Figur 1.1: Karta över Singapore



Kommentar. Karta över Singapore med en röd markering där kollapsen ägde rum. Hämtad från Wikipedia. (2008). *Singapore map*. https://sv.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Singapore_map.svg

1.1 Metod

Arbetet genomförs huvudsakligen som en kvalitativ litteraturstudie baserat på tillgängliga rapporter, artiklar samt flertalet böcker inom området geoteknik. Data kommer samlas in genom databaser där Google Scholar är den främsta. Källorna som använts för rapporten anses ha en hög trovärdighet då majoriteten av den data som använts är tagna ur tekniska rapporter gjorda om kollapsen vid Nicoll Highway. Utöver dessa, användes också flertalet böcker och rapporter som källor till bakgrunden som också ansågs vara trovärdiga. Rapporten resulterar i en sammanfattning/slutsats till varför det skedde en kollaps vid Nicoll Highway baserat på litteraturstudien och insamlad data. De sökorden som främst användes var “Nicoll Highway”, “MRT failure”, “Plaxis”, “retaining wall”, “safety culture” samt “deep excavations”. Nackdelen med att använda tillgängliga rapporter är att vissa rapporter har ett subjektivt perspektiv och därför presenterar “vinklad” information. Fördelen är att det finns många olika rapporter att analysera för att sedan få en objektiv helhetsbild baserad på sammanlagda resultat.

1.2 Avgränsning

Arbetet har avgränsats till att inte innefatta simuleringar eller beräkningar av schaktet samt att arbetet baseras på den nuvarande information som finns tillgänglig bland relevanta databaser. Inga egna tester eller undersökningar kommer genomföras på plats eller i laboratorium. Arbetet avgränsas även tidsmässigt till en period på cirka fyra månader för att följa en given studieplan.

2

Bakgrund

I detta kapitel presenteras relevant bakgrundsinformation om geotekniska teorier såväl som bakgrund om Singapore. Till en början presenteras Singapores geologiska historia och nuvarande formationer samt viktiga geologiska parametrar. Sedan förklaras skjuvhållfasthet och deformationer i jord, och slutligen ges en övergripande beskrivning av vanliga konstruktionsdelar vid en byggnation av schakt.

2.1 Jordegenskaper

Jordegenskaper är en avgörande information för att en konstruktion eller schaktning ska utföras säkert (Lundström m.fl., 2015). Denna rapport kommer generellt att skilja på kohesionsjord och friktionsjord när bakgrundsteori och beräkningsmetoder presenteras. Det som skiljer dem åt är framförallt kornstorleken, där friktionsjord har större korn som innefattar sand eller grus. Kohesionsjord har en betydligt mindre kornstorlek, vilket motsvarar lera eller silt. En faktor som är avgörande för jordens egenskaper är mängden vatten som ryms i jordlagret. Mellan kornen finns hålrum som antingen kan vara fyllda med vatten eller luft vilket påverkar jordens egenskaper på olika sätt. I kohesionsjord är hålrummen oftast fyllda med vatten, medan friktionsjordar är betydligt torrare (så länge det inte ligger under grundvattennivån).

2.1.1 Övergripande geologi och stratigrafi för Singapore

För 75 000 år sedan under istiden Wurm/Wisconsin var Singapore täckt med is (Bo m.fl., 2015). Tyngden av isen gjorde att Singapore låg 140 meter under havsnivån. 10 000 år senare smälte isen helt vilket ledde till en transgression, som innebär att havsnivån höjs igen i förhållande till markytan. Det tog cirka 10 000 år för Singapore att befinna sig över ytan, dvs för 55 000 år sedan. Processerna under och efter istiden har bidragit till att Singapore formades med hjälp av avsättningar och erosion. I området där kollapsen av MRT ägde rum bestod jordlagren av marin lera, alluvium och kallang formationen. Den nuvarande marina leran har bildats på grund av cykler av regression där land under havsnivån kommer upp till ytan samt finmaterial som transporterades av inlandsisen.

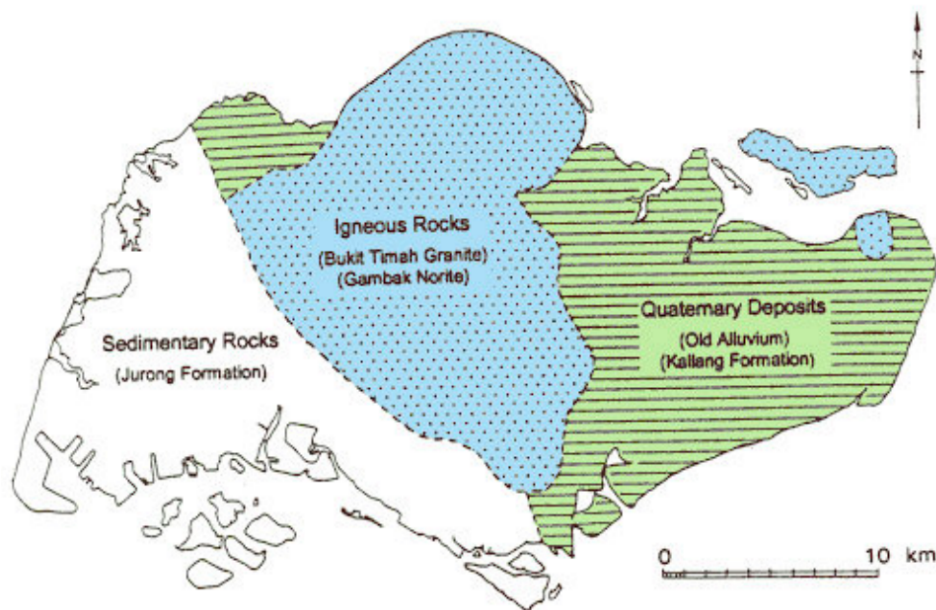
Singapores äldsta berggrundsbildningar består av Sajahat-formationen och Gombak norit, som båda bildades för ungefär 540 till 445 miljoner år sedan (Gang, 2012). Sajahat-formationen utgörs av kvartsit och argillit medan Gombak norit utgörs av norit och gabbro. De yngre bergrunderna är Bukti Timah granit och Jurong formationen som bildades mellan 250 till 175 miljoner år sedan. Bukti Timah granit

2. Bakgrund

utgörs bland annat av granit och diorit. Jurong formationen utgörs av röd sandsten och slamsten, samt fossilrik kalksten och konglomerat.

I stora drag delas Singapore in i tre delar utefter berg- och jordarters geografiska placering (Gang, 2012). Den västra delen består av Jurong formationen, en sedimentär bergart. Centralt i Singapore finns det Gombak norit och Bukit Timah granit, som båda är magmatiska bergarter. Östra delen är till största del den äldre alluviala avlagringen men i sydöst har även kallang formation bildats, dessa är kvartär sediment.

Figur 2.1: Karta över geologi i Singapore



Kommentar. Berg- och jordarters geografiska placering i Singapore. Bild från Gang, C. J. (2012). *Geology of Singapore*. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf

En nyare formation är en alluvial avlagring som är en jordart som bildades mellan 5 miljoner till 500 000 år sedan (Zhou, 2009). Den alluviala formationen är sediment bestående av lerig sand och grus med avlagringar eller skikt av lera och silt. Alluviala avlagringar återfinns vid havskuster, sjöar och undervattensdalar och skapas vid erodering längs vattendrag. Detta sediment ligger ovanpå en bas av berggrunden Bukit Timah granit och kan nå ett djup på över 200 meter. Formationen i sig är mjuk men blir mer kompakt med tiden, detta specifikt vid områden där andra jordlager bildats ovanpå. Permeabiliteten är generellt låg i denna formation, dock är den högre i vittrade områden.

Den yngsta formationen i Singapore började bildas för 140 000 år sedan och heter kallang formationen. Denna formation ligger ovanpå den alluviala formationen och finns i östra Singapore (Gang, 2012). Kallang formationen kan nå ett djup på 80 meter och av dessa kan den delas in i fem olika komponenter, där den största komponenten är den marina leran bestående av övre och undre marina lager. Jordlagrens

tekniska egenskaper i läget för Nicoll Highway redovisas i kapitel 3.

Marin lera är en jordart som avsats vid havskuster. Det speciella med marin lera är att när havsvatten kommer i kontakt med lerpartiklar sker en så kallad flockulering (Abbaslou m. fl., 2020). Detta sker när fria joner i havsvatten bryter upp lerpartiklar för att sedan omformas till att ha olika egenskaper. När vatten avgår från leran och utsätts för uttorkning kan leran därefter svälla igen vid vatteninfiltration. Den marina leran kan därför bli sensitiv och problematisk vid byggande av konstruktioner.

2.1.2 Mättnadsgrad och permeabilitet

Geotekniska egenskaper hos ett jordmaterial påverkas av relationen mellan porvolymen, porvatten och porgas (Statens Geotekniska Institut [SGI], 2008). Relationen mellan vattenfylld porvolym och total porvolym i ett material kallas för vattenmättnadsgrad, S_r , enligt ekvationen nedan.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \quad (2.1)$$

Vattenmättnadsgrad uttrycks i procent och beskriver hur stor andel av den erhållna porvolymen som är fylld med vatten. Detta innebär alltså att $S_r = 0\%$ erhålls för ett helt torrt material och $S_r = 100\%$ för vattenmättad jord.

Permeabilitet anger hur genomträngligt ett material är för vatten (SGI, 2008). Vid beräkning av permeabilitet är Darcys lag användbar, dock endast vid laminärt flöde. Exempelvis är Darcys lag oanvändbar vid flöde genom grus och sten då det kan uppstå ett turbulent flöde. Utöver vilken typ av strömning som erhålls, har också strömningriktning en stor inverkan på permeabilitetsvariation i jorden, framförallt vid leror som innehåller siltskikt. En lera som innehåller siltskikt gör att permeabiliteten blir betydligt större i horisontalriktning än i vertikalriktning. Permeabiliteten påverkar grundvattensänkning, infiltration, föroreningsspredning och injekterbarhet. Permeabilitet har även stor betydelse när det gäller bestämning av effektivspänning i jord och till exempel vid val av dränerad eller odränerad beräkningsmodell för stabilitet och bestämning av tidsberoende sättningar.

2.1.3 Dränerade och odränerade tillstånd

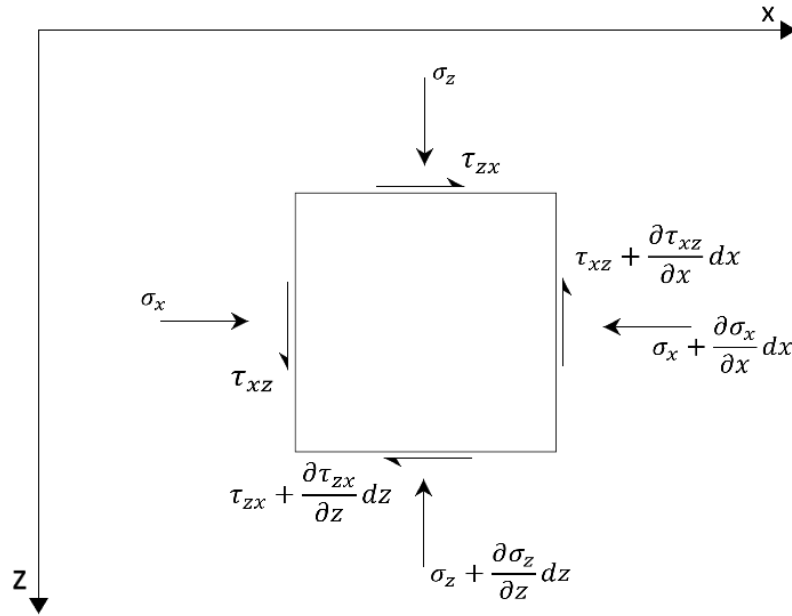
När en vattenmättad jord utsätts för totalspänningsförändringar kommer vattnet till en början ta emot all spänningsförändring, vilket medför att ett porvattenövertryck bildas (Knappett & Craig, 2020, s. 80–82). Beroende på jordens permeabilitet tar det olika lång tid för vattnet att dissipera. På så sätt bildas momentant porvattentryck utöver det statiska vattentrycket. Om ingen volymändring sker kallas detta då att jorden är i ett odränerat tillstånd. När vattnet sedan trycks ut ur jorden kommer porvattenövertrycket att minska och vattentrycket går tillbaka till att endast bestå av statiskt vattentryck. När allt porvattenövertryck har försvunnit befinner sig jorden i ett dränerat tillstånd. Hela detta förlopp utgör en konsolideringsprocess, vilket beskrivs mer detaljerat i kapitel 2.2.2. Om en jord är i dränerat eller odränerat tillstånd, eller mer sannolikt någonstans däremellan, påverkar det dess

effektivspänning och därmed dess respons och egenskaper, exempelvis skjuvhållfasthet, se kapitel 2.1.4.

2.1.4 Skjuvhållfasthet

Skjuvning och skjuvspänningar uppkommer när vertikal- och horisontalspänningar ej är lika stora, se figur 2.2 (Knappett & Craig, 2020, s. 149–150). Där σ_x och σ_z

Figur 2.2: Spänningsmodell



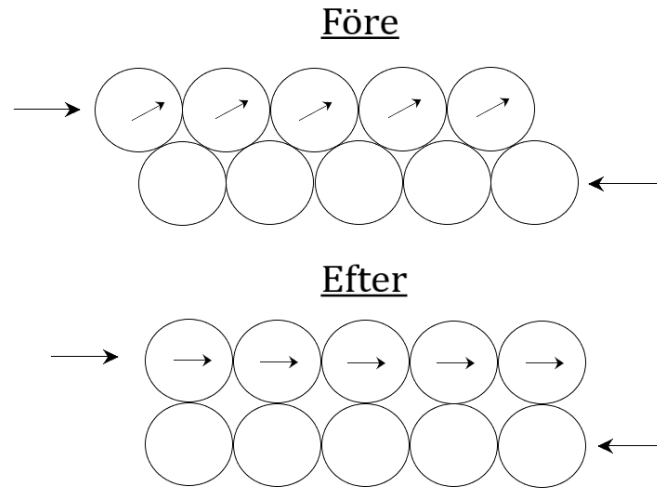
Kommentar. Tvådimensionella spänningsförhållanden för totalspänningar i en jord. Baserad på bild från Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press.

är normalspänningarna i x- respektive z-led, τ_{xz} och τ_{zx} skjuvspänningarna, $\partial\sigma_x/\partial x$ och $\partial\sigma_z/\partial z$ förändringen i normalspänningen i x- respektive z-led, och $\partial\tau_{xz}/\partial x$ och $\partial\tau_{zx}/\partial z$ förändringen i skjuvspänningen i x- respektive z-led. Genom momentberäkningar runt mittpunkten av jordelementet finnes att $\tau_{xz} = \tau_{zx}$.

En jords skjuvhållfasthet beror på friktionen mellan jordpartiklarna, som i sin tur beror på de vertikala och horisontella effektivspänningarna (Knappett & Craig, 2020). Ju mer spänning som verkar direkt på partiklarna desto större friktionskrafter uppstår mellan dem. Det som kan påverka en jords skjuvhållfasthet är alltså om något skulle förändra spänningen som verkar direkt på jordskelletet, det vill säga något som skulle förändra effektivspänningen. Ett exempel på en sådan påverkan är mängden porvatten som befinner sig i jorden, eftersom $\sigma' = \sigma - u$. Portrycket tar en del av normalspänningarna och minskar friktionen mellan jordpartiklarna, vilket minskar jordens skjuvhållfasthet. I tätt packade friktionsjordar kommer en betydande del av skjuvhållfastheten även från att kornen ligger om lott och måste på så vis

“rulla över” varandra för att skjuvningsdeformationer ska uppstå, se figur 2.3 (Sällfors, 2013, s. 5.1). Ett vanligt sätt att modellera förhållandet mellan normal- och

Figur 2.3: Kornstruktursmodell



Kommentar. Enkel modell över kornstrukturen i en packad friktionsjord före och efter skjuvning. Baserad på bild från Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press.

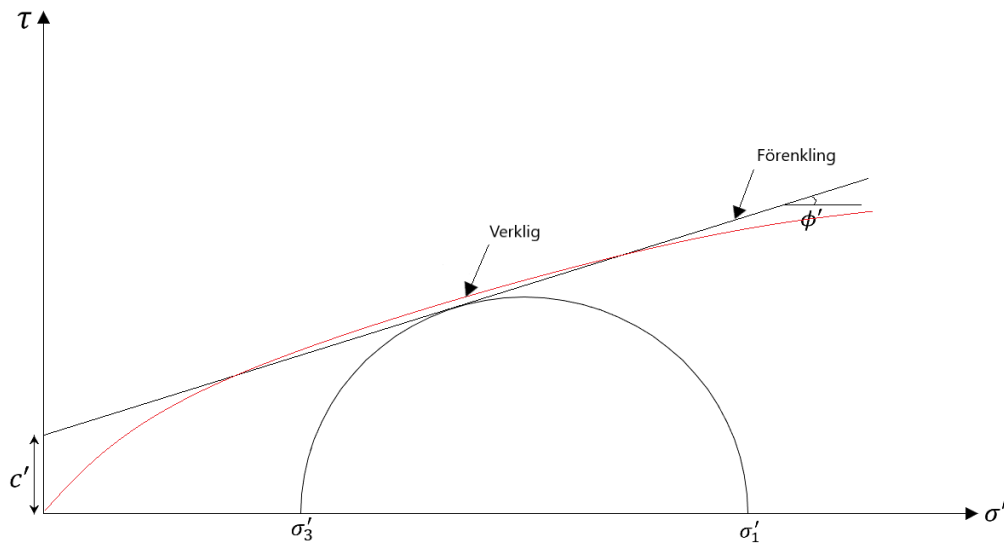
skjuvspänningarna i en jord i två dimensioner är att använda sig av den så kallade Mohr-Coulomb modellen, se figur 2.4 (Knappett & Craig, 2020, s. 157–159). Modellen går ut på att man plottar skjuvspänningen på y-axeln och effektivspänningen på x-axeln, där spänningstillståndet sedan representeras med Mohrs cirkel som definieras av σ'_1 och σ'_3 . Jorden sägs då nå brott när cirkeln precis rör vid brottenvelopen i en enda punkt. Brottenvelopen är inte nödvändigtvis rätlinjig, men det är ett antagande som görs för att förenkla modellen. Mohr-Coulomb's brottenvelop definieras enligt ekvation 2.2.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

Där c' är kohesionsintercept och ϕ' jordens inre friktionsvinkel. Dessa två skjuvhållfasthetsparametrar är dock inga fysiska egenskaper hos jorden, utan matematiska konstanter som definierar ett linjärt förhållande mellan skjuv- och effektivspänningen (Knappett & Craig, 2020, s. 159). En anledning till varför denna metod ofta används är för att den minskar antalet spänningsvariabler som behöver användas för att beskriva förhållandena. I vanliga fall krävs tre variabler (σ'_x , σ'_z , τ_{zx}), men med en Mohr-cirkel behövs endast två (σ'_1 , σ'_3).

Hittills har dränerade parametrar använts för att definiera Mohr-Coulomb's brottkriterium, men det går även att använda odränerade parametrar med denna modell för att beräkna när en jord går i brott. Istället används då σ_1 och σ_3 för att definiera Mohrs cirkel (Knappett & Craig, 2020, s. 160). Detta kommer att resultera i en annorlunda brottenvelop i förhållande till den dränerade analysen, där skjuvhållfasthetsparametrarna istället benämns c_u och ϕ_u . Den inre friktionsvinkeln ϕ_u antas

Figur 2.4: Mohr-Coulomb's brottkriterium



Kommentar. Mohr-Coulomb's brottkriterium där den verkliga brottenvelopen symboliseras av den röda linjen, och den förenklade av den räta linjen. Baserad på bild från Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press.

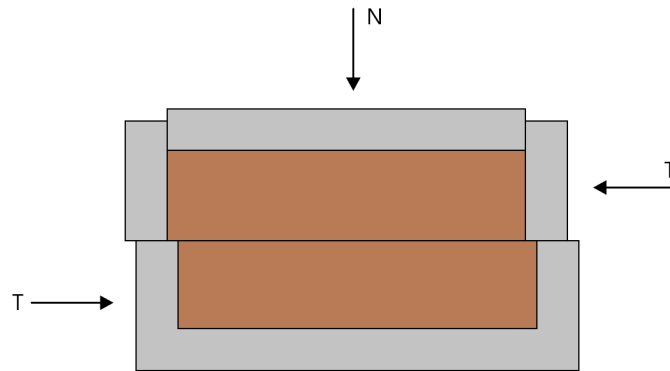
alltid vara noll vid odränerad analys (Knappett & Craig, 2020, s. 160). Antagandet görs utifrån ett flertal experiment där triaxialförsök utförts på leror i odränerat tillstånd och då funnits att den inre friktionsvinkeln blir noll (Skempton, 1948). Detta antagande har vissa begränsningar, men är tillräckligt noggrann för att kunna appliceras i de flesta praktiska situationer.

Beslut om lämplig analys för specifika geologiska förhållanden och problemställningar beror främst på hur snabbt totalspänningarna i jorden förändras i förhållande till konsolideringshastigheten (Knappett & Craig, 2020, s. 160–161). För lågpermeabla jordar, som exempelvis lera och silt, vid belastningar under kort tid kan en odränerad analys vara passande. För högpermeabla jordarter, som sand och grus, där porvattenöverskott ej bildas eller dissiperar mycket snabbt, är en dränerad analys mer passande både för belastningar under lång och kort tid. En dränerad så kallad effektivspänningsanalys kan också utföras på lera under konsolidering. Då måste portryck och effektivspänning simuleras för att kunna avgöra till exempel lerans skjuvhållfasthet.

En jords skjuvhållfasthetsparametrar kan bedömmas genom exempelvis laboratorietest, där ett jordprov utsätts för vissa spännings- och konsolideringsförhållanden. Resultatet används sedan för att avgöra jordens skjuvhållfasthet. Det finns ett antal olika tester för att få fram dessa parametrar, exempelvis genom ett så kallat direkt skjuvförsök (DS). DS används främst för att mäta dränerad skjuvhållfasthet (Knappett & Craig, 2020, s. 161–163). Jordprovet placeras då i en metalllåda som är delad horisontellt på mitten. Dessa två låddelar rör sig sedan i sidled relativt varandra tills

brott uppstår och skjuvkraften, T , som drivit jordprovet till brott noteras, se figur 2.5. Detta genomförs för olika prover från samma jord med vertikalkrafter, N , i oli-

Figur 2.5: Direkt skjuvförsök



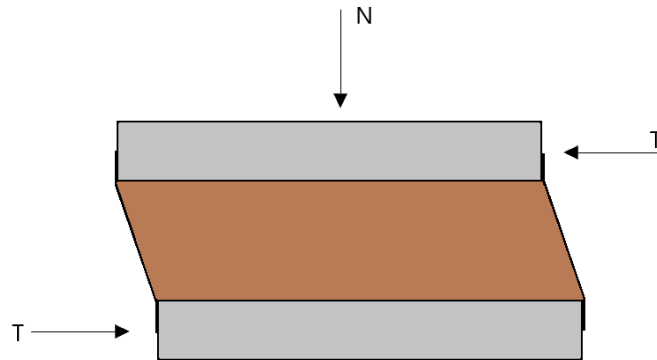
Kommentar. En skiss av hur ett DS ser ut. Baserad på bild från Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press.

ka magnituder. Resultatet presenteras genom att de vertikala spänningarna plottas mot skjuvspänningen vid brott. Vertikal- och skjuvspänningarna utvinns genom att dividera vertikal- och skjuvkrafterna med jordprovets tvärsnittsarea. En trendlinje genom dessa punkter ger skjuvhållfasthetsparametrarna c' och ϕ' på samma sätt som de är definierade i brottenvelopen, alltså att c' är där linjen korsar y-axeln och ϕ' är linjens lutning.

Ett annat exempel på ett laborietest är "direct simple shear test" (DSS). Detta test liknar ett direkt skjuvförsök i sitt genomförande, då man lägger sitt jordprov i en låda och förskjuter låddelarna i sidled åt varsitt håll. Skillnaden kommer i att lådans väggar är gjorda på så sätt att de tillåter jordprovets sidor att rotera, se figur 2.6 (Knappett & Craig, 2020, s. 174–175). De kan till exempel vara gjorda av ett slags gummimembran. Fördelarna med att använda ett DSS över ett DS är att vid ett DS får man bara fram skjuvhållfasthetsparametrarna för mitten av jordprovet, då det är där skjuvning uppstår (Knappett & Craig, 2020, s. 163). Detta även fast den svagaste punkten kan vara någon annanstans i provet. Detta kan leda till en överskattning av jordens skjuvhållfasthet, då den bara är så stark som sin svagaste punkt. Ett DSS deformerar hela provet utan att skapa en förutbestämd skjuvyta, vilket innebär att skjuvning borde uppstå i den svagaste punkten (Knappett & Craig, 2020, s. 174–175). Detta borde således ge en mer representativ uppskattning av jordens skjuvhållfasthetsparametrar.

Det vanligaste och mest använda laborietestet är det så kallade triaxialförsöket (Knappett & Craig, 2020, s. 163–166). Fördelen med detta test är att dräneringsförhållandena kan kontrolleras, och att porvattentrycket kan uppmätas. Detta innebär till exempel att en vattenmättad lera med låg permeabilitet kan konsolideras som en del av försöket. Eftersom porvattentrycket mäts kan resultatet även uttryckas i termer av effektivspänningarna inuti provet, istället för att endast kunna använda

Figur 2.6: DSS



Kommentar. En skiss av hur ett DSS ser ut. Baserad på bild från Rose, A. (2021). Introduction to Direct Simple Shear Testing. <https://www.vjtech.co.uk/blog/introduction-to-direct-simple-shear-dss-testing>

de applicerade totalspänningarna. Testet går till så att ett cylindriskt prov, vanligtvis med ett höjd/diameterförhållande på 2, placeras i en behållare med ett visst vattentryck i, se figur 2.7. Provet belastas sedan axiellt genom tryck från maskinen, och radiellt av det omgivande vätsketrycket. Skjuvning kan då appliceras på provet genom att hålla det radiella trycket konstant, och sedan öka det axiella trycket till brott. Skjuvning uppstår oftast på ett diagonalt plan genom provet, som syns i figur 2.7.

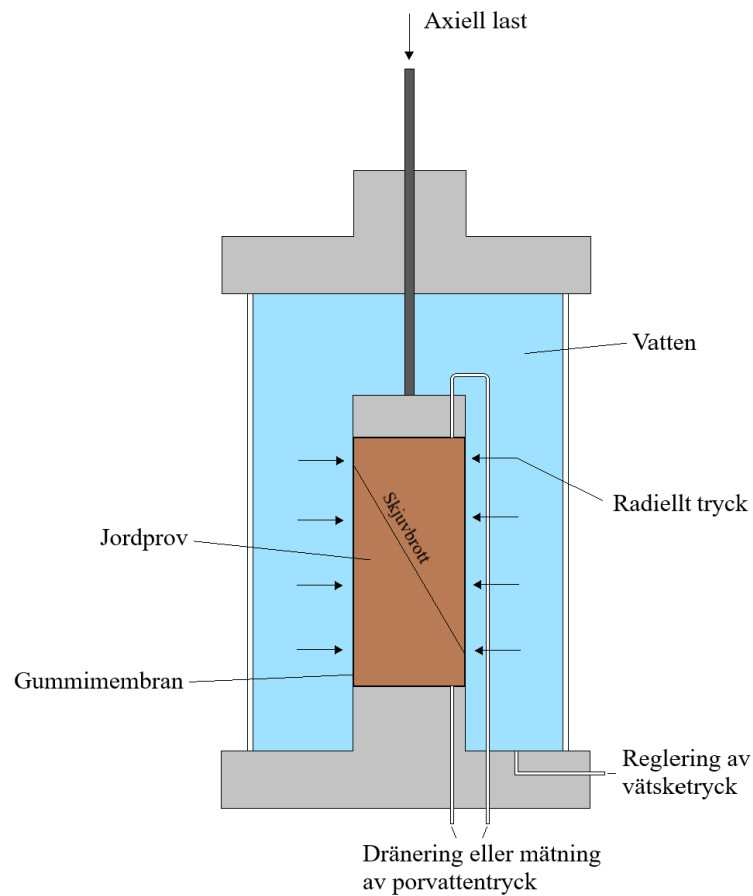
2.2 Deformationsegenskaper

Till skillnad från många andra material, är fallet för jord komplicerat när det gäller deformationsegenskaper. Detta beror på att egenskaperna påverkas av spänningsnivåer och således även av spänningshistorian för jorden (Sällfors, 2013). Jordar betraktas som ett trefasmaterial, de kan också betraktas som ett tvåfasmaterial om jorden är vattenmättad, bestående av luft, vatten och jordpartiklar. Detta gör att vatten har stor påverkan på hur jorden reagerar vid belastning. Trots de relativt komplexa deformationsegenskaperna, kan de i flesta fall förenklas som ett kontinuerligt linjärelastiskt material där delar av den generella elasticitetsteorin kan användas.

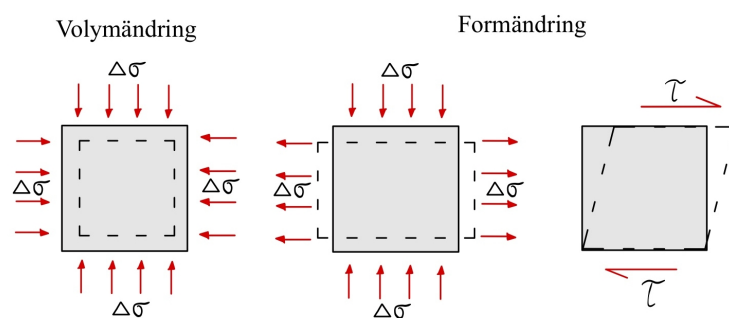
2.2.1 Deformationstyper

På grund av de många olika parametrar som påverkar deformationsegenskaperna är det extra viktigt att förstå vilka randvillkor som gäller för den situation som skall modelleras. Små skillnader i ingångsvärden vid laborationstesterna kan skapa stora skillnader mellan resultatet och det verkliga fallet. Deformationsfall kan delas in i två huvudgrupper: volymändring samt formändring, se figur 2.8.

För att erhålla precisa resultat är det viktigt att proverna i så stor utsträckning som

Figur 2.7: Triaxialförsök

Kommentar. En förenklad skiss av hur ett triaxialförsök ser ut. Baserad på bild från Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press

Figur 2.8: Deformationstyper

Kommentar. Två huvudtyper av deformation. Inspirerad av (Sällfors, 2013, s. 4.2)

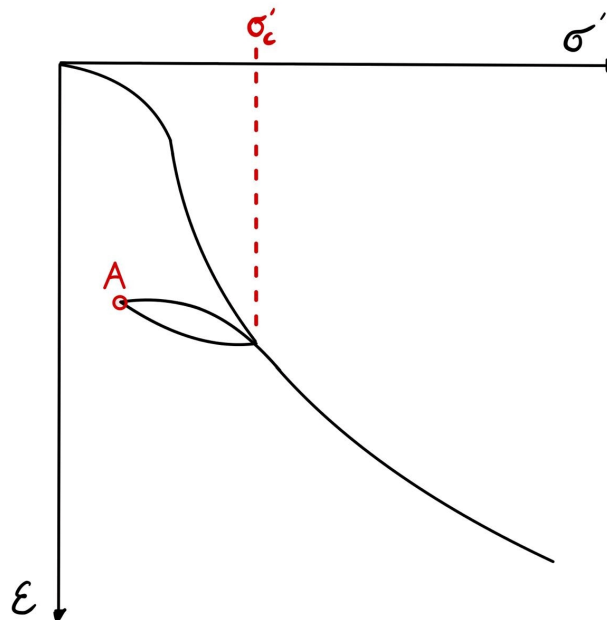
möjligt är ostörda (Sällfors, 2013). Med ostörda menas att struktur, spänningshistoria och jordvolym förblir densamma för de prover som laborationsförsöken utförs

på som den jord som finns i fält. En störning kan exempelvis vara vibrationer som uppstår när jordprovet transporteras till laboratoriet.

Att beräkna och förutse deformationer försvåras ytterligare av det faktum att, likt andra material, jordars deformation delas upp i elastisk och plastiskt tillstånd samt att de kan vara momentana och tidsberoende (Sällfors, 2013). Likt deformationstyperna behöver inte en jord uppträda elastiskt eller plastiskt utan kan ha egenskaper som beskrivs med hjälp av en kombination av de båda. Det är viktigt att skilja på momentana eller tidsberoende då dessa är väldigt avgörande för hur den planerade strukturen dimensioneras. De tidsberoende deformationerna brukar delas in i två olika grupper, konsolidering och krypning, se kapitel 2.2.2.

Som tidigare nämnt är spänningshistorien för jorden en faktor vid beräkningar och planering av laboratorietester. Om en jords effektivspänningar ökar på grund av sedimentation, byggnation av en struktur eller något liknande, kommer deformation att uppstå. Om jorden sedan avlastas genom erosion eller rivningsarbeten, kommer begränsade relativt kompression volymförändringar att ske (Sällfors, 2013, s. 4.5). Det som dock har förändrats är strukturen i jorden vilket gör att den kommer att reagera annorlunda vid en återbelastning.

Figur 2.9: Inverkan på deformationerna av spänningshistorien



Kommentar. Denna kurva visar hur en jords deformation påverkas av spänningshistorien

När ödometerförsök utförs på svenska lösa leror, för att undersöka hur dessa kommer att deformeras vid belastning, kommer deformationskurvan ofta att likna den i figur 2.9. Det som ofta skiljer sig är från punkt A och uppåt på grafen vilket beror på en tidigare belastning som sedan har avlastats. Detta gäller oavsett om jorden tidigare har utsatts för högre belastning eller inte då ett fenomen uppstår som benämns som åldring. Åldring leder till att det kan uppstå ett förkonsolideringstryck utan en tidigare överlast och detta kallas ofta för kvasi-förkonsolideringstryck (SGI, 1995). För en tydligare förklaring till dessa begrepp, se avsnitt 2.2.2.

2.2.2 Konsolidering

Med konsolidering menas den volymändring som erhålls då en jord belastas (Knappe & Craig, 2012). Denna belastning gör att effektivspänningen förändras då vatten i jorden trycks undan och därmed leder till en volymändring. Konsolidering kan också uppstå när grundvattennivån sjunker och porvattentrycket sjunker med tid vilket gör att vertikal deformation erhålls.

Deformationen kommer att fortsätta fram tills att det överflödiga porvattentrycket helt har försvunnit (Sällfors, 2013). Denna process är nämnvärt långsammare i jordar med låg permabilitet, som exempelvis lera, till skillnad från permeabla jordar som sand. Det är också därför den tidsberoende deformationen är mindre påtaglig i permeabla material eftersom större delen eller hela sker relativt snabbt efter belastningen. Hur jordlagren kommer att reagera på en ny belastning beror på jordens egenskaper samt vilket konsolideringsfall som uppstår. Som syns i figur 2.9 skiljer sig de vertikala deformationerna nämnvärt beroende på om belastningen överstiger förkonsolideringstrycket. Detta syns tydligt då deformationen är förhållandevis liten fram till förkonsolideringstrycket vilket är den punkt som σ'_c pekar på, se figur 2.9. Om belastningen överstiger förkonsolideringstrycket leder detta till att jorden anses vara normalkonsoliderad annars anses den vara överkonsoliderad.

2.3 Jordtryck

Jordtryck är den belastning som påverkar en konstruktion. En stödkonstruktion måste dimensioneras för att kunna hantera de spänningar som finns i jordlagren samt de jordtryck som uppstår mot konstruktionen. Vid horisontell markyta påverkas jorden av spänningar i tre dimensioner, den vertikala samt de horisontella σ_x , σ_y och σ_z . (Sällfors, 2013, s. 3.1). Det vertikala jordtrycket påverkas direkt av jorden ovanför det studerade elementet och är således oftast den största av de tre. σ_z brukar i kontexten av beräkning istället betecknas σ_0 och beräknas enligt ekvationen nedan.

$$\sigma_0 = \sum \gamma_i z_i \quad (2.3)$$

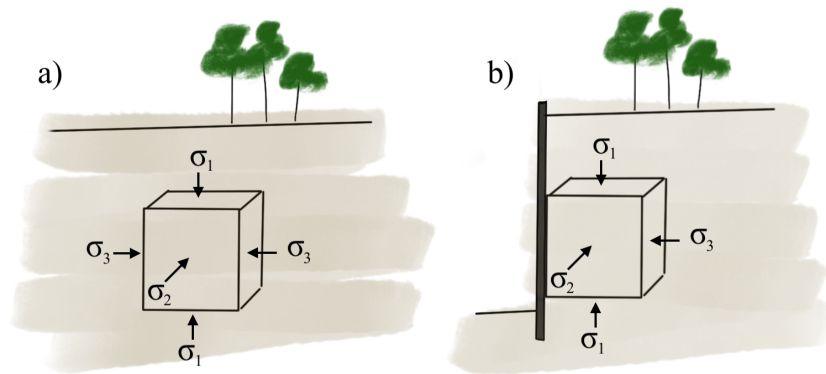
γ_i är beteckningen för tungheten på jorden och kan i sin tur beräknas enligt ekvationen nedan.

$$\gamma_i = g\rho_i \quad (2.4)$$

2.3.1 Passivt och aktivt jordtryck

För att förstå hur jordtrycket agerar vid ett schakt måste först tryck i vila betraktas. De tre tidigare nämnda huvudspänningarna demonstreras i figur 2.10 a. Kuben i figuren visar en del av jordmassan och hur respektive spänning verkar i olika riktningar. Genom att gräva bort jord på ena sidan av blocket försvinner den mot hållande kraften från denna sidan, se figur 2.10 b. Den resulterande kraften riktas då mot schaktväggen (Hallowell, 2012). Förutom jordens egna tryck kan det även finnas laster på marken i form av byggnader eller byggmaskiner.

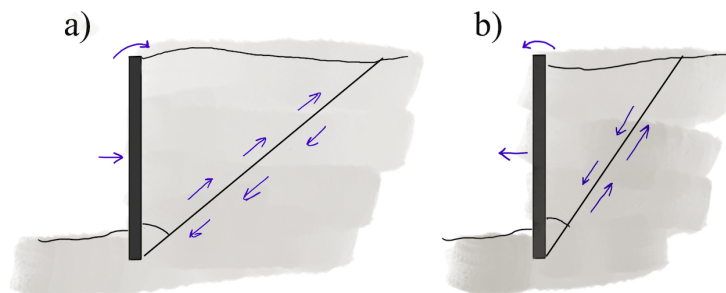
Figur 2.10: Jordtryck



Kommentar. Jordtryck i a) vila och vid b) schakt. Resulterande kraften i a) är lika med noll. Resulterande kraft i b) riktas mot schaktet.

Ponera att stödmuren trycks, eller roterar, inåt mot jordmassan. Detta medför att jorden komprimeras och ett brott sker. Den lösa jordmassan närmast schaktet är den massa som stödmuren håller uppe (Hallowell, 2012). Jordens egentynghd kommer sedan att motverka brott. Detta kallas för passivt jordtryck och illustreras i figur 2.11 a. Om jorden istället rör sig in mot schaktet i samband med murens rörelse, sker ett brott där jordens egentynghd medverkar (Sällfors, 2013). Detta kallas för aktivt jordtryck och illustreras i figur 2.11 b.

Figur 2.11: Passivt och aktivt jordtryck



Kommentar. a) Passivt jordtryck med brottvinkel $= 45 + \frac{\phi'}{2}$ och b) aktivt jordtryck med brottvinkel $= 45 - \frac{\phi'}{2}$.

Olika jordarter beter sig olika vid schaktning, därför är det viktigt att veta de specifika egenskaperna för den jorden man arbetar i samt hur det samspelar med grundvattennivå och stödkonstruktioner. Aktivt respektive passivt jordtryck (gränsjordtryck) beräknas enligt ekvation 2.5 och 2.6 (Sällfors, 2013) och påverkas alltså av vertikalspänning, kohesionsintercept och friktionsvinkeln. De baseras på Rankines teori som förutsätter glatta konstruktioner (råhet=0), horisontell markyta samt rörelser tillräckligt stora för att skapa jordtrycken (Knappett & Craig, 2020, s. 464–466).

$$p_a = \sigma' \tan^2(45 - \phi'/2) - 2c \tan(45 - \phi'/2) + p_w \quad (2.5)$$

$$p_p = \sigma' \tan^2(45 + \phi'/2) + 2c \tan(45 + \phi'/2) + p_w \quad (2.6)$$

Som tidigare nämnts skapar även vattnet i jorden ett tryck. Kohesionsjord och friktionsjord beter sig olika vid vattentryck och således även beräkningarna. Eftersom friktionsvinkeln antas vara lika med noll ($\phi' = 0$) vid odränerad analys ser ekvationer för aktivt respektive passivt jordtryck ut enligt följande.

$$p_a = \sigma'_0 - 2c + p_w \quad (2.7)$$

$$p_p = \sigma'_0 + 2c + p_w \quad (2.8)$$

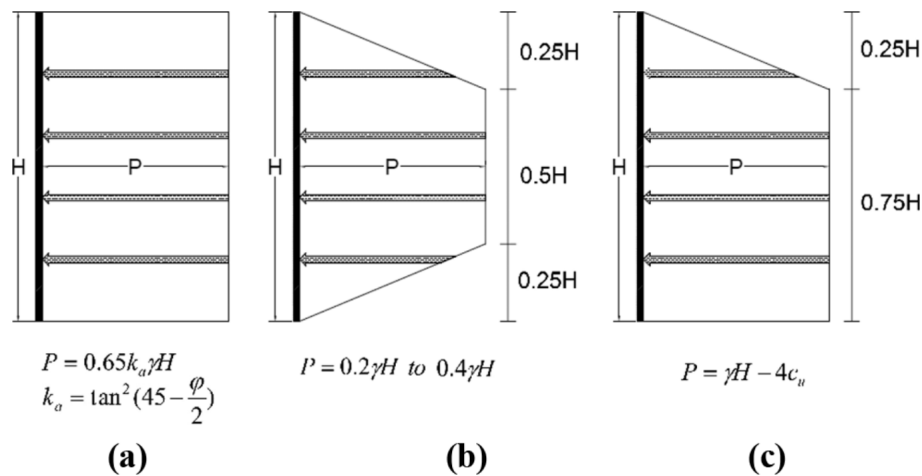
Vid friktionsjordar under vattentryck beräknas passivt och aktivt jordtryck med ekvation 2.9 och 2.10 (Sällfors, 2013) där c' försummas.

$$p_a = \sigma'_0 \tan^2(45 - \phi'/2) + p_w \quad (2.9)$$

$$p_p = \sigma'_0 \tan^2(45 + \phi'/2) + p_w \quad (2.10)$$

Med hjälp av så kallade jordtrycksdiagram (eng. apparent earth pressure diagrams) kan stämpkrafter för stödkonstruktioner med mer än en stämpnivå uppskattas, det vill säga statistiskt obestämnda. Jordtrycksdiagram används för att designa förankrade väggar baserat på jordtrycksfördelning (Shahir & Alavinezhad, 2020). Jordtrycksdiagram togs exempelvis fram av Terzaghi och Peck, 1967, se figur 2.12. Vid avläsning av dessa diagram bör följande antaganden beaktas:

- Utgrävningen ska minst vara 6 meter djup och tillräckligt bred för att vägg-rörelser ska ske.
- Grundvatten nivån ska antas ligga under schaktbotten.
- Jordmassan ska antas vara homogen och markens egenskaper ska vara odränerad för lera och dränerad för sand.
- Lasterna under schaktbotten påverkas inte.

Figur 2.12: Jordtrycksdiagram

Kommentar. Jordtrycksdiagram i a) Sand b) Hård lera c) Lös lera. Diagram från Shahir, H. & Alavinezhad, S. P. (2020). *Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c-φ soil with surcharge*. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-09-2019-0269/full/html>

2.3.2 Bottenuppträckning

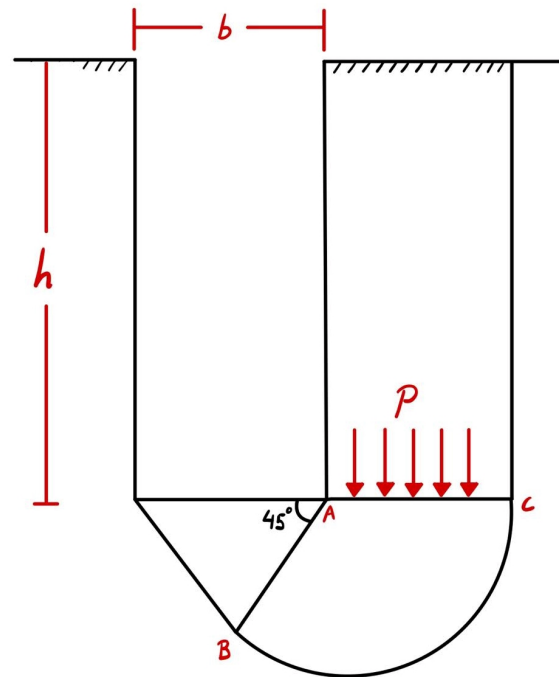
Bottenuppträckning är en brottmekanism där schaktbotten trycks upp samtidigt som omgivande jordnivåer sjunker (Lundström m. fl., 2015). Bottenuppträckning inträffar då skjuvhållfastheten i jorden i kombination med stödskonstruktionens kapacitet är otillräckliga för att motverka en obalans i vertikala krafter utanför jämfört med innanför spontväggarna (Knappett & Craig, 2012, s. 454). I figur 2.13 visas en förenklad beräkningsmodell/brottmekanism som togs fram av Terzaghi 1943 (Knappett & Craig, 2012). Trycket (P) utanför schaktväggen erhålls som tidigare nämnts av det vertikala jordtrycket utanför schakten. Detta tillsammans med andra utomstående krafter, exempelvis bygglaster, kan leda till en bottenuppträckning om dessa överskrider jordlagrens och stödskonstruktionens mothållande krafter.

Säkerhetsfaktorn mot bottenuppträckning kan beräknas med ekvation 2.11 (Sällfors, 2013).

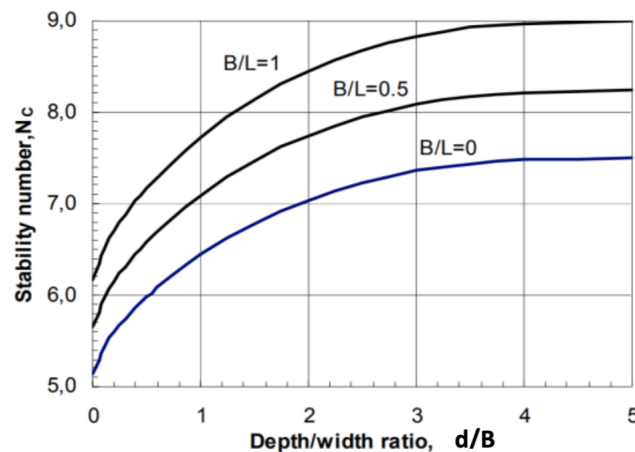
$$F_c = N_c \frac{\tau_{fu}}{\gamma H + q - p} \quad (2.11)$$

Bärlighetsfaktor avläses från diagrammet i figur 2.14 som baseras på dimensionerna på schaktet.

Hydraulisk bottenuppträckning är en annan typ av brottmekanism som kan uppstå då schaktning ger en vattentrycksskillnad mellan schaktet och omgivande jordmån. Denna typ av brott kan inträffa på grund av att lägre belägna, grövre, jordlager har ett vattentryck som överstiger vikten av ovanliggande lågpermeabla jordlager. Hydraulisk bottenuppluckring sker på grund av att vatten transporteras från högre tryck till lägre tryck, vilket påverkar effektivspänningarna i jorden. Detta kan ske vid schakter och kallas då, om det leder till brott/kollaps, för hydrauliskt grundbrott.

Figur 2.13: Bottenuppsyckning

Kommentar. Illustration som beskriver hur bottenuppsyckning erhålls vid schaktning. Figur inspirerad av Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2012). *Craig's Soil Mechanics* (8:e upplagan). Spoon Press.

Figur 2.14: Bärighetsfaktor

Kommentar. Bärighetsfaktor, N_c , beroende av dimensioner av schaktet. Hämtad från Karlsrud, K. & Andresen, L. (2008). *Design and performance of deep excavations in soft clays*. Norwegian Geotechnical Institute.

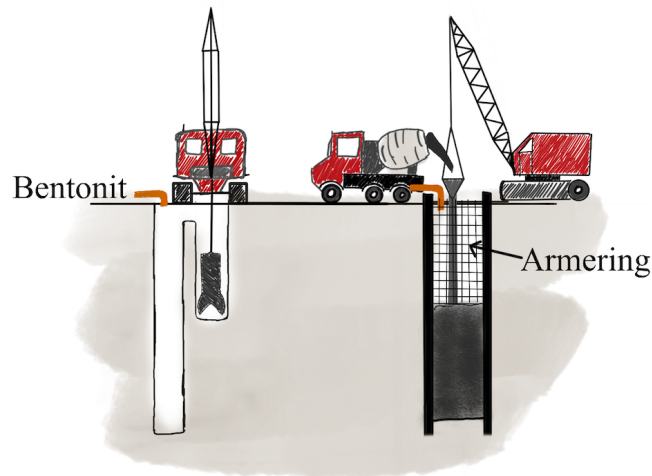
Vid vattentrycksskillnader kan även jordpartiklar transporteras från jordlager med mindre kornstorlek till lager med större kornstorlek och skapa rörgångar, vilket luckrar upp jorden och minskar hållfastheten.

2.4 Stödkonstruktioner

Stödkonstruktioner används vid schakt där slänter ej är möjligt på grund av säkerhetskrav eller brist på arbetsområde. Stödkonstruktionens syfte är att ta upp omgivande jord- och vattentryck som verkar in mot schaktet baserat på deformationskrav. Antingen tillfälligt eller permanent.

Spont kan används vid temporära schakt, exempelvis för djup grundläggning (SGI, 2019). Spont är en stålprofil som vibreras eller slås ner i marken vilket stör omgivningen i form av rörelser i marken eller buller. Det finns även träspont, plastspont och glesspont som alla har olika funktioner.

Slitsmur är en typ av betongvägg som vanligtvis används för att uppta jordtryck och grundvatten vid djupa schakter (Knappett & Craig, 2020, s. 498–499). Den kan gjutas på plats eller tillverkas prefabricerat och monteras på plats. Vid platsgjutning sker först utgrävningen i samband med att en borrhälska fyller upp utgrävningen, vanligtvis bestående av bentonit blandat med vatten. När bentonit mixas med vatten bildas en gel-liknande produkt som kan hålla tillbaka jordtrycket tills att schaktet fylls med betong. När utgrävningen är klar förs en armeringskonstruktion ner i massan samt ett rör till botten som sedan pumpas ut betong nedifrån och upp, samtidigt som borrhälskan pumpas ut. Se figur 2.15 för konstruktionsprocess. Detta upprepas för varje sektion som kan anta en längd på cirka 2-10 meter. När väggen är klar i sin helhet kan utgrävningen börja. Byggprocessen genererar relativt lite vibrationer och dess påverkan på närliggande konstruktioner är därav minimal. Däremot kan ändå stora deformationer uppstå efter byggnation vilket också är viktigt att ta hänsyn till. Gäller dimensioner av slitsmurar är tjockleken från 0,50 m till 1,50 m (Ergun, 2008). I jordar med lägre hållfasthet krävs kortare sektioner vilket också genererar högre kostnader. Varje sektion kan dimensioneras för olika djup där slitsmuren kan antas upp till 100m.

Figur 2.15: Slitsmur

Kommentar. Slitsmur under konstruktion. Inspirerad av Webster Technologies. (u. å). *Diaphragm Walls*. Hämtad 10 mars 2022, från <https://www.webstertechnologies.co.uk/wp-content/uploads/Diaphragm-Wall.jpg>

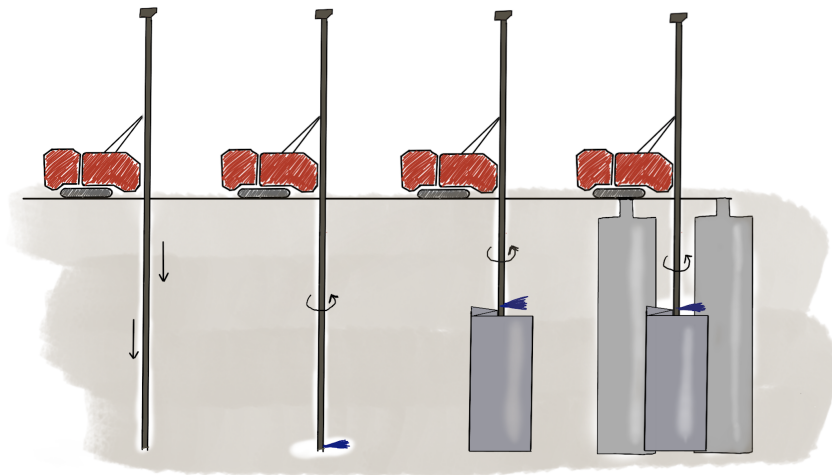
En annan stödkonstruktion är sekantpålevägg (Saman Pey Co, u. å). Den utgörs av platsgjutna pålar som tillverkas genom att gjuta i en förborrad form eller självborrande i marken. För att göra en tät vägg, gjuts pålarna i ett överlappande mönster där varannan påle borrar i första steget, för att sedan gjuta de överlappande pålarna i andra steget. Jetinjektering är en annan typ av påle som självböras ner i jorden. En borrar förs ner till önskad djup och cement sprutas ut med högt tryck samtidigt som borrar, roterande, förs ut ur marken. Cementen blandas då med omliggande jord och skapar en cylinderformad pelare som förstärker bärigheten och motverkar sättningar i jorden, se figur 2.16.

Stämp används för att komplettera stödkonstruktioner genom att ta upp tryck mellan schaktväggarna (Ergun, 2008). Stämp kan nyttjas horisontellt mellan schaktväggar för att minska böjmoment och skjuvkrafter som jordtrycket orsakar. Temperaturförändringar kan också påverka belastningen på stämpan. Mellan stämpan och omgivande stödkonstruktion placeras hammarband (eng: wale eller wailer) som tar upp och överför de laterala krafterna (Artola, 2005). Hammarbandet kan anta många olika former men är ofta en H-balk horisontalt längs stödkonstruktionen. Stämpan kan fästas på H-balken med hjälp av strävor (eng: splays) vilket gör att lasten fördelas jämnare från stämpan till hammarbanden.

Stag är också vanligt för att avlasta stödkonstruktioner för att förankra väggarna i omgivande jord eller berg (Knappett & Craig, 2012). Detta medför en dragkraft i staget som håller muren tillbaka från schaktet. Stagen utgörs av stålvastrar eller stålstänger som borrar in och förankras i jorden/berget, vilket gör att stagets dragkraft beror på jordens (eller bergets) motståndskraft. De kan placeras horisontellt eller med en lutning från väggen och nedåt. Förankringen kan se ut på olika sätt beroende på vinkel och jordtyp. Se stämp och stag i figur 2.17.

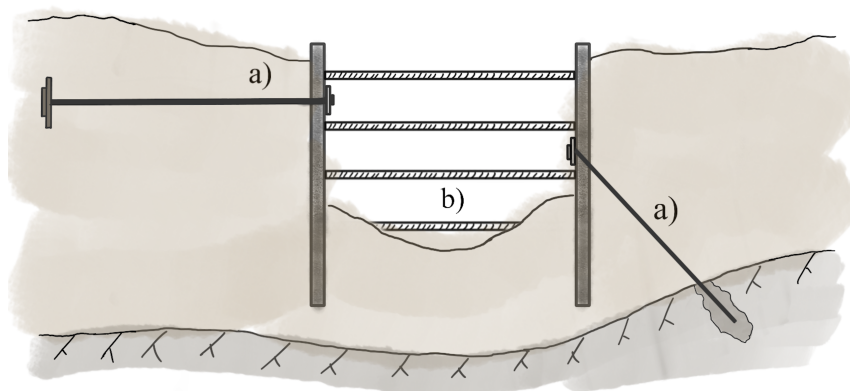
Vid byggnation av tunnlar kan olika metoder användas. Cut and cover innebär att

Figur 2.16: Jetinjektering



Kommentar. Jetinjektering under konstruktion. Inspirerad av Dahlblom, O. & Persson, K. (2019). *Samverkansgrundläggning med JET Grouting*. <https://www.geoteknik.lth.se/utbildning/examensarbete-civiling/lediga-examensarbeten/samverkansgrundlaeggning-med-jet-grouting/>

Figur 2.17: Stag och stämp



Kommentar. a) Stag och b) stämp i ett schakt

tunneln grävs ut ovanifrån i form av ett schakt och täcks sedan över för att skapa taket. Två vanliga metoder för cut and cover är top-down och bottom-up (Jon, 2014). Top-down innebär att permanenta konstruktionselement installeras från början av utgrävningen, så som bjälklag, uppifrån och ner. Vid Bottom-up metoden används tillfälliga stödkonstruktioner vid utgrävning, för att börja montera de permanenta konstruktionselementen nerifrån och upp.

3

Jordlagren vid olycksplatsen

Nicoll Highway är placerad i sydöstra Singapore. Jordlagerföljden vid Nicoll Highway redogörs nedan, se figur 3.1. Kallang formationen befinner sig över en äldre alluviala avlagring och kan delas upp i fem olika komponenter (Gang, 2012). En komponent är bestående av marin lera och kan delas upp i ytterligare två delar, övre marin lera och undre marin lera. Den övre marina leran befinner sig på ett djup på 20 till 30 meter under havsbotten och består av blågrå lera, sandig lera och tunna lager av sand och torv. Leran har ett varierande innehåll av organiskt material men består generellt av hälften lerfraktioner och hälften siltfraktioner (Bo m. fl., 2015). De huvudsakliga mineralerna i den marina leran i Singapore är kaolinit, illit och smektit. Dessa mineraler i den övre marina leran har en flockulerad struktur. Den odränerande skjuvhållfastheten för en övre marina lera är mellan 10 och 30 kPa. Lera är överkonsoliderad och har en överkonsolideringskvot mellan 1.5 till 2.5.

Den undre marina leran befinner sig på ett djup på 30 till 50 meter under havsbotten och består generellt av samma innehåll som den övre marina leran (Bo m. fl., 2015). Undre marin lera har en odränerad skjuvhållfasthet mellan 30 och 60 kPa och en överkonsolideringskvot mellan 3 och 5. Något som ytterligare skiljer den undre marina leran från den övre är att den övre marina leran är mer benägen till att svälla vid vatteninfiltration på grund av dess flockulerade mineralsktuktur. Båda marina lerorna har en permeabilitet på $k = 10^{-9} m/sek$ (Whittle & Davies, 2006). För ytterligare parametrar på den övre och undre marina leran se tabell 3.1.

I figur 3.1 presenteras kallang formationen och dess komponenter samt den äldre alluviala formationen. En av komponenterna inom kallang formationen är en övergångskomponent som ursprungligen bildats från flodmynningar. Denna finns ovanpå det övre lagret av marin lera men även nedanför den undre marina leran. Övergångskomponenten består till största del av organiskt material som torv och lerig torv men innehåller även mörk mjuk lera samt lerig sand (Zhou, 2009). En annan komponent som finns mellan det övre och undre lagret av marin lera är en alluvial komponent som är ungefär 3 till 5 meter tjockt. Det ligger även ett lager av den alluviala komponenten nedanför övergångskomponenten under den nedre marina leran. Den alluviala komponenten kommer ursprungligen från fluviala sediment och kan delas upp utefter de varierande materialinnehållen. Den alluviala komponenten i kallang formationen är yngre än den äldre alluviala avlagringar som ligger under kallang formationen. För parametrar på den alluviala komponenten liggandes mellan den övre och undre marina leran se tabell 3.2. De två andra komponenterna

Tabell 3.1: Parametrar för marin lera

Parametrar	Övre Marin lera	Undre Marin lera
Skrymdensitet (kN/m^3)	14.2-15.7	15.7-16.6
Vattenkvot (%)	70-88	40-60
Konflytgräns (%)	80-95	65-90
Plasticitetsgräns (%)	20-28	20-30
Portal	1.8-2.2	1.1-1.5
Kompaktdensitet	2.6-2.72	2.7-2.75
Kompressionsindex	0.6-1.5	0.6-1.0
Kompressionsindex vid återbelastning	0.09-0.16	0.14-0.2
Konsolideringskoefficient – vertikal ($\text{m}^2/\text{år}$)	0.47-0.6	0.8-1.5
Konsolideringskoefficient – horisontell ($\text{m}^2/\text{år}$)	2-3	3-5
Överkonsolideringskvot	1.5-2.5	2
Permeabilitet (m/sek)	10^{-9}	10^{-9}

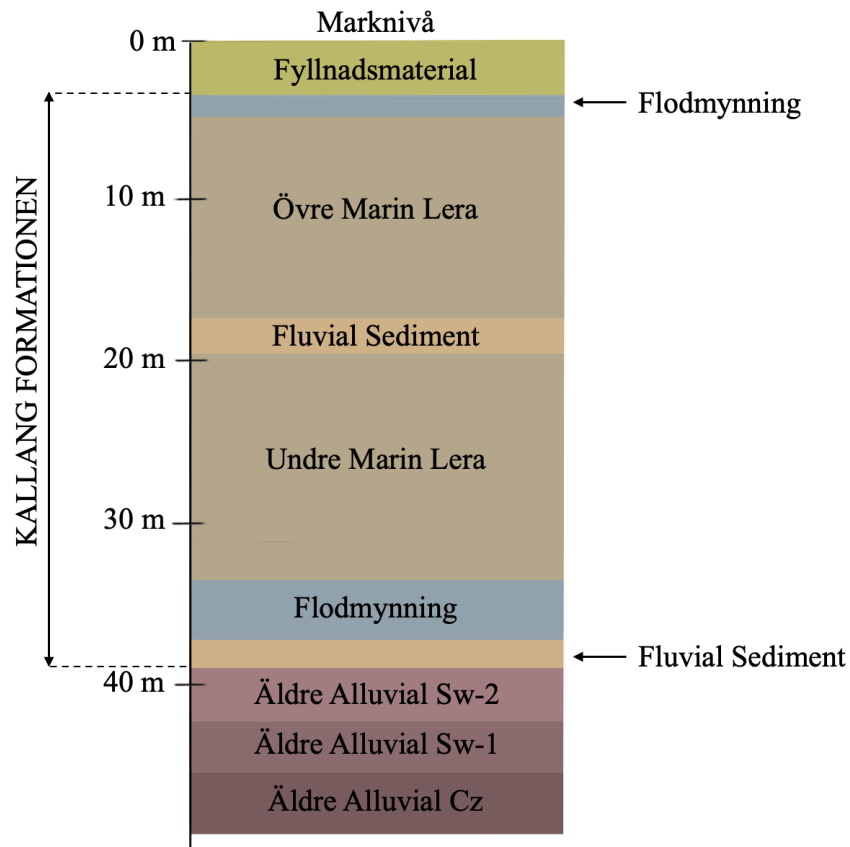
Kommentar. Olika parametrar för den övre och undre marina lera. Tabellvärden tagna från Bo, M. W., Arulrajah, A., Sukmak, P. & Horpibulsuk, S. (2015). *Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi*. Japanese Geotechnical Society.

Tabell 3.2: Parametrar för den alluviala komponenten

Parametrar	Mellanliggande Alluvial
Skrymdensitet (kN/m^3)	18.6-19.6
Vattenkvot(%)	10-35
Konflytgräns(%)	50
Plasticitetsgräns (%)	18-20
Portal	0.7-0.9
Kompaktdensitet	2.68-2.76
Kompressionsindex	0.2-0.3
Kompressionsindex vid återbelastning	0.08-0.15
Konsolideringskoefficient – vertikal ($\text{m}^2/\text{år}$)	1-4.5
Konsolideringskoefficient – horisontell ($\text{m}^2/\text{år}$)	5-10
Överkonsolideringskvot	3-4

Kommentar. Parametrar för den alluviala komponenten mellan den övre och undre marina lera. Tabellvärden tagna från Bo, M. W., Arulrajah, A., Sukmak, P. & Horpibulsuk, S. (2015). *Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi*. Japanese Geotechnical Society.

inom kallang formationen är en komponent skapad av vågzoner och en komponent som ursprungligen är från korallrev. Dessa två komponenter befinner sig i centrala Singapore och är därför inte ingående i jordlagerföljden vid Nicoll Highway. För en överblick på jordlagerföljden vid Nicoll Highway se figur 3.1

Figur 3.1: Typisk jordlagerföljd

Kommentar. En typisk sektion av jordlagerföljden vid Nicoll Highway. Inspirerad av Whittle, A. J. & Davies, R. V. Nicoll Highway Collapse: Evaluation of Geotechnical Factors Affecting Design of Excavation Support System. I: International Conference on Deep Excavations (Singapore, 28–30 juni 2006)

Den äldre och djupare alluviala formationen under kallang formationen är 5 till 10 meter tjockt och går att dela upp i tre delar utefter vittrade zoner och hur kompakt lagren är (Whittle & Davies, 2006). Dessa zoner betecknas W, SW-2 och SW-1. SW-2 är den översta och ligger direkt under kallang formationen. SW-1 är placerad under SW-2. Den tredje delen betecknas CZ och är ett mer kompakt lager av äldre alluvial formation, denna befinner sig nederst. De ingående materialen i den äldre alluviala formationen består av kompakt, lerig grus och sand med avlagringar av ler- och siltfraktioner. Eftersom CZ är kompakt har den en lägre permeabilitet än de två lagren ovan som har en permeabilitet på $k = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/sek}$.

4

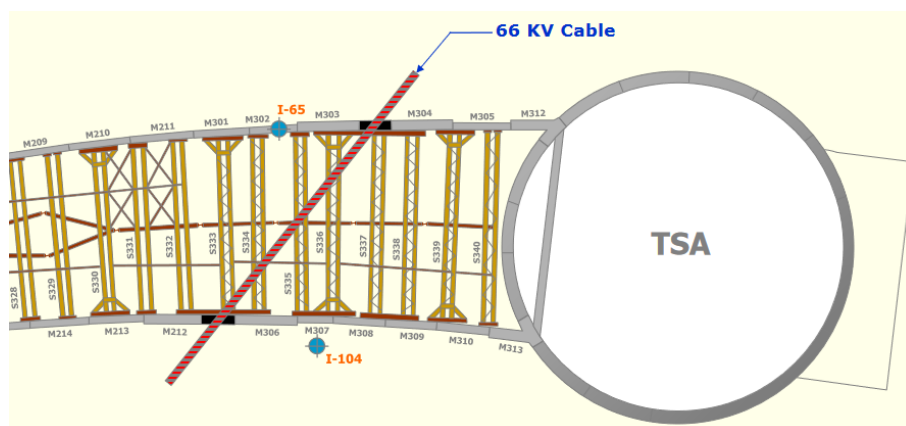
Konstruktionen

Kollapsen vid Nicoll Highway inträffade i samband med byggnationen av MRT Circle line. Järnvägen planerades att gå jämsides med Nicoll Highway, i en tunnel. Tunneln konstruerades med cut-and cover metoden, dvs genom urschaktning som sedan täcks över med bjälklag. I byggskedet användes bottom-top metoden där de permanenta konstruktionsdelarna monteras från botten av schaktet och uppåt medan de provisoriska konstruktionsdelarna avmonteras.

4.1 Slitsmur

I Singapore har slitsmurar och stämp använts för tunnelbanestationer sedan 1978 och denna form av konstruktion har använts flitigt i Singapore sedan dess (Ng, 2021). Slitsmuren till schaktet var gjord av armerad betong med 800 mm tjocklek där schaktväggarna placerades cirka 20 m från varandra. Vid området där kollapsen skedde var stödmurarna placerade längs en krökt linjedragning, se figur 4.1, vilket krävde extra förstudier gällande design och utformning. Djupet på slitsmuren varierade för varje sektion. I figur 4.1 syns även en kabel (66 kV Cable) som korsar schaktet. För att inte förstöra kabeln byggdes ingen slitsmur vid just den sektionen, vilket gjorde att hela muren var diskontinuerlig. TSA i figur 4.1 står för Temporary

Figur 4.1: Planvy på konstruktionen



Kommentar. Ritning med placering av stämp, diskontinuerliga hammarband samt underliggande kabel. Hämtad från Sin, W. K. (2004). *Lessons Learned from The Nicoll Highway Incident*. <http://smces.org.sg/wp-content/uploads/2014/10/nicoll-highway-incident-22-october-2014.pdf>

Staging Area och är troligtvis till för att transportera ut och in maskiner eller diverse byggnadsmaterial.

4.2 Stämp

Slitsmurarna stöttades med hjälp av 10 nivåer stålstämp som placerade ca 3 till 4 m, i höjd, från varandra för att stödja de laterala jordtrycken (Ng, 2021). Stålstämpan mellan schaktväggarna anslöt mot hammarband i form av H-balkar. Krökningen av slitsmuren medförde att hammarbanden inte kunde installeras kontinuerligt utan bestod av ett flertal kortare balkar, eller var ibland helt utan hammarband, se figur 4.1. Från stämp till hammarband placerades strävor, även det för att ta upp och överföra laster. Dessvärre placerades dessa strävor inte på alla stämp, se bild på utförande i figur 4.2.

Figur 4.2: Stämp, hammarband och strävor



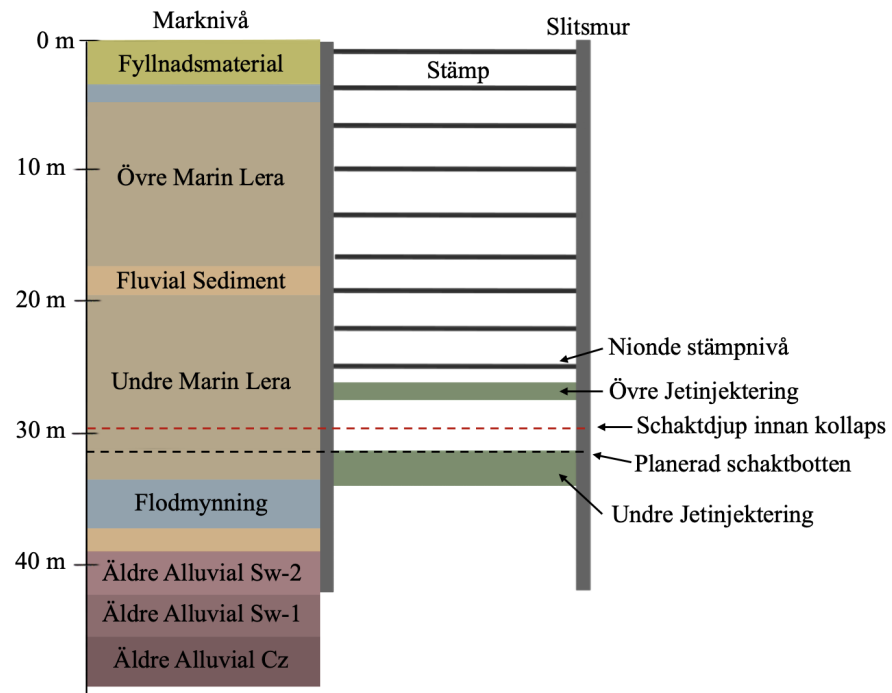
Kommentar. Vänster: Stämp och hammarband. Höger: Stämp och hammarband med strävor. Hämtad från Committee of Inquiry. (2005). *Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004*. Singapore, Ministry of Manpower

4.3 Jetinjektering

Vid Nicoll Highway användes jetinjektering för att förstärka marken och minska risken för bottenuppträckning under byggnationen (Ng, 2021). Mohr-Coulomb modellen användes som materialmodell för att konstruera jetinjekteringen. Jetinjekteringen var konstruerad under utgrävningsnivån som stöd för ovanliggande pålar eftersom marken bestod av mjuka leror. För djupa schaktningar som omringas av mjuka leror sker deformationer. För att förhindra detta vid Nicoll Highway byggdes två lager av jetinjektering som stabiliserade schaktet, se figur 4.3. Det övre lagret av jetinjekteringen var tillfällig och skulle tas bort under ett senare skede av utgrävningen (Jerman & Masin, 2021). Det övre jetinjekteringslagret var 2 meter djupt och låg under den nionde stämpnivån. Den undre jetinjekteringslagret var permanent och cirka 1,5 meter djupt. Dessa lagren av jetinjektering agerar även som en typ

av stämp som håller emot jordtrycket på schakten (Ng, 2021). Kollapsen inträffade efter att den övre jetinjekteringen hade tagits bort, samtidigt som den 10e stämpnivån installerades. Undersökningar som gjorts i efterhand visar att jetinjekteringen inte genomfördes ordentligt i närheten av den tidigare nämnda kabeln som korsade schaktet, vilket medförde en svag punkt i konstruktionen.

Figur 4.3: Tvärsektion av schakt



Kommentar. En typisk tvärsektion av schaktet som visar placering av stämp, slitsmur och jetinjekteringen samt schaktdjup innan kollaps och planerad schaktbotten

5

Kollapsens händelseförlopp

Klockan var 8.30 den 20 april 2004 när de första byggarbetarna gav sig ner i schaktet för att påbörja dagens arbete (COI, 2005). Vid denna tid kunde ett flertal personer höra ett knakande ljud nere från schaktet. Någon timme senare lokaliserade de ljudet till hammarbanden på stämplnivå 9 och 10. Andy Wong, en av ingenjörerna, kom till platsen strax efter rapporter om det knakande ljudet och han begav sig ner i schaktet. De hade nyligen bytt ut en del i hammarbandens förstärkning, vilka han nu tydligt kunde se hade bucklat. Andy Wong beslutade i samråd med andra ingenjörer att pausa resterande arbete och gjuta på betong runt hammarbanden som förstärkning på stämplnivå 9 och 10. Byggarbetarna påbörjade arbetet och förmiddagen flöt på. Vid 13-tiden hade ett flertal arbetare sett stämpan vara bänd uppåt på ett flertal ställen samtidigt som de knakande ljuden blev allt mer frekventa. Arbetet med att gjuta på hammarbanden var svårt då de redan var så deformerade. Vid 14-tiden hade ett antal byggarbetare åkt upp till marknivå då de var rädda för att vistas i schaktet. Medan byggarbetarna kvar i schaktet väntade på den andra leveransen av cement satt de på en av stämpan. Deras kollega vittnar om hur han hade kunnat se stämpan böjd uppåt i en båge. Strax efter 15-tiden började svetsfogen på hammarbanden att spricka upp och det knakande ljudet kunde höras var 20:e sekund. Strax efter detta signalerade en av arbetsledarna att det var dags att utrymma schaktet samtidigt som de skrek till byggarbetarna att börja springa. En av byggarbetarna berättade följande "When I was rushing half-way to the scaffold access, I also saw the diaphragm wall at the bottom of the excavation caved inwards." Uppe vid toppen såg Andy Wong hur slitsmuren vid sidan om Nicoll Highway rasade in mot schaktet och drog med sig en byggkran ner. Schaktet kollapsade och strax därefter exploderade en gasledning, se figur 5.1. Då var klockan 15.30.

Kollapsen resulterade i att en krater med diameter 100 m och ett djup på ungefär 13 meter formades bredvid utgrävningen (Endicott, 2015). Cirka tio minuter efter kollapsen kom 75 personer från Singapore Civil Defence Force (SCDF) till platsen med hundar för att hitta alla överlevande (Ahmad, 2017). Den första kroppen hittades vid 18-tiden på kvällen samma dag. Den fjärde och sista kroppen hittades aldrig och SCDF avbröt sitt sökande tre dagar efter kollapsen.

Figur 5.1: Kollapsen vid Nicoll Highway



Kommentar. Kollapsen vid Nicoll Highway 20 april 2004 Committee of Inquiry. (2005). Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004. Singapore, Ministry of Manpower

6

Dimensioneringen av stödkonstruktionen

En dimensionering genomfördes innan påbörjandet av utgrävningen för att avgöra hur stödkonstruktionen och dess komponenter behövde utformas. Komponenternas dimensioner baserades helt på modelleringar och beräkningar som gjordes med finita element metoden (FEM) i datorprogrammet Plaxis (Whittle & Davies, 2006). Med FEM har man möjligheten att modellera hur marken uppför sig med avseende på deformationer och grundvattenflöden, och även hur detta interagerar med och påverkar komponenterna i konstruktionen. Detta gör Plaxis med hjälp av icke-linjära finita elementanalyser i två dimensioner, vilket var relativt nytt vid denna tidpunkt. Tidigare hade endimensionella finita elementanalyser använts, och den nya metoden gjorde att man mycket mer noggrant kunde analysera och modellera komplexa geotekniska system. Nackdelen är dock att denna mer sofistikerade typ av analyser också är mer avancerad och för denna tiden relativt ny. Med andra ord; även fast Plaxis hade potentialen att mer exakt beskriva verkliga markförhållanden och förändringar, var kunskapen i att använda programmet begränsad hos designteamet.

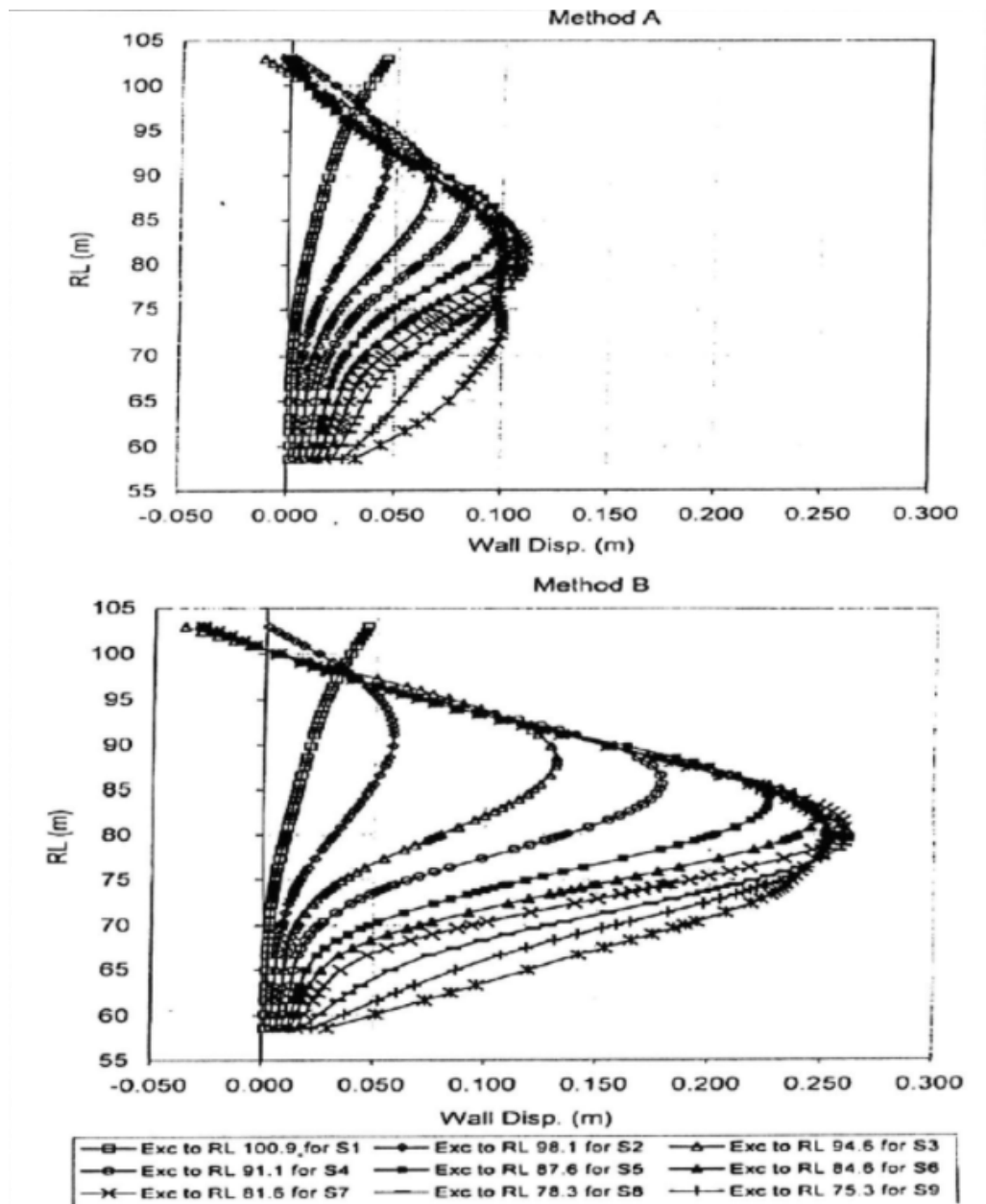
I Plaxis finns ett stort antal modeller för att beskriva en jords beteende. Bland dem finns den klassiska Mohr-Coulomb modellen, som presenterades i kapitel 2.1.4. Det var också denna modellen man valde att använda för dimensioneringen i detta projektet (Whittle & Davies, 2006). Som tagits upp tidigare i kapitel 2.1.4, det finns två sätt att representera en odränerad leras skjuvhållfasthet. Det ena är med de dränerade parametrarna c' och ϕ' , och det andra är med de odränerade parametrarna c_u och ϕ_u ($= 0$). Dessa två representationer kommer att kallas för Metod A respektive Metod B.

När man i Plaxis genomförde analysen som låg till grund för designen för stödkonstruktionen, valde man att använda sig av dränerad analys, Metod A, för att representera den odränerade skjuvhållfastheten i den marina leran. Många experter påpekar dock att det mest lämpliga hade varit att använda sig av odränerad analys, Metod B, vid rådande förhållanden (COI, 2005). Anledningen till att man valde Metod A var att man använde sig av en hjälpmanual för Plaxis när man utförde analyserna (COI, 2005). Enligt experter som läste manualen i efterhand kunde en oerfaren användare av programmet bli missvisad av manualen att använda sig av Metod A för odränerad analys av lösa leror (COI, 2005).

Effekterna av att man använde sig av dränerad analys, Metod A, i stället för odräne-

rad analys, Metod B, var att man grovt överskattade den marina lerans odränerade skjuvhållfasthet (Whittle & Davies, 2006). Detta ledde till att man underskattade böjmomenten och utböjningarna i slitsmuren med ungefär 50%, se figur 6.1 (COI, 2005). Detta påverkade i sin tur den dimensionerade kapaciteten i stämpan, som

Figur 6.1: Utböjningen för slitsmurarna



Kommentar. Diagram över skillnaden i slitsmurarnas utböjning vid användning av Metod A och Metod B, där Metod B visade ungefär dubbelt så stora utböjningar. Bild tagen från Artola, J. (2005). *A Solution to the Braced Excavation Collapse in Singapore*. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology.

underskattades med 10% vid stämplnivå 9. Experter har dock gjort analyser med Metod B i efterhand och funnit att de utböjningar som analysen beskriver fortfa-

rande är mindre än de som observerades i slitsmuren under konstruktionen (COI, 2005). Det spekuleras att detta kan bero på att stämpan och marken under utgrävningens nivå inte gav slitsmuren tillräckligt med stöd.

Det felaktiga användandet av Metod A var det mest uppenbara felet som gjordes under dimensioneringen, men utöver detta fanns det även andra fel som begicks vilket också påverkade konstruktionens hållfasthet negativt. Bland dessa var att den lägre nivån av jetinjekteringen var designad för att ha en tjocklek på 2.6 m i marinleran, men vid FE-analysen användes en tjocklek på 3 m (COI, 2005). Dräneringsförhållandena i den äldre alluviala leran missbedömdes också, där man antog att den var fritt dränerande (Whittle & Davies, 2006). Detta trots att ett mer realistiskt antagande hade varit att den betedde sig odränerat, med tanke på den relativt korta tiden som utgrävningen skulle ta.

Krökningen av schaktet medförde ett flertal problem för konstruktionen (Ng, 2021). Eftersom förundersökningen endast genomfördes i 2D togs troligtvis inte hänsyn till effekterna av krökningen vid dimensionering av slitsmuren. Krökningen av schaktet medförde även att stämpan inte kunde installeras korrekt. Hammarbanden var inte kontinuerliga längs med schaktväggarna, vilket medförde att de förlorade sin funktion. Hammarband överför jordtrycket från schaktväggar till stämp, och desto större överföringsytan är desto jämnare fördelas kraften.

Som nämndes i kapitel 4.1 var slitsmuren tvungen att vara diskontinuerlig för att låta en elkabel korsa schaktet. Detta ledde till att sand och lera läckte in i schaktet och att det var svårt att installera stämp kontinuerligt (Ng, 2021).

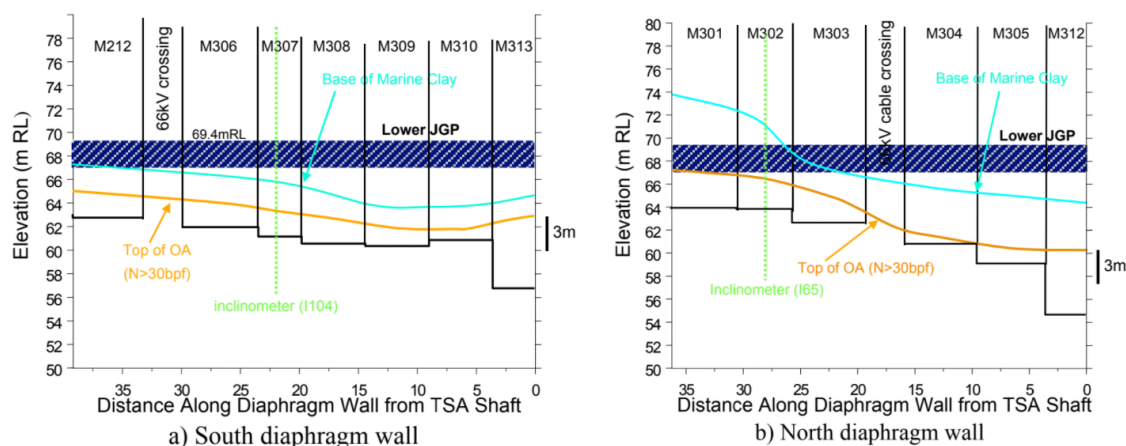
7

Brister vid genomförandet

7.1 Stödkonstruktionen

Slitsmurarna var tänkta att installeras tre meter ned i det undre alluviumlagret, något som inte följdes under själva utförandet, se figur 7.1 (COI, 2005). Detta ledde

Figur 7.1: Djupet på slitsmurarna



Kommentar. Diagram över djupet på slitsmurarna vid sektion där kollaps skedde. I diagrammet syns även hur slitsmuren är diskontinuerlig på grund av en 66kV kabel som korsade schaktet. Bild tagen från Whittle, A. J. & Davies, R. V. Nicoll Highway Collapse: Evaluation of Geotechnical Factors Affecting Design of Excavation Support System. I: International Conference on Deep Excavations (Singapore, 28–30 juni 2006).

till större utåtbuktningar och rotationer i murarna. Eftersom det passiva jordtrycket inte blev tillräckligt stort utsattes även stämpan och jetinjekteringen för mer tryck än vad de var designade för. Enligt mätinstrumenten noterades dock inte att stämpan upplevde ett ökat tryck, vilket innebar att det endast var jetinjekteringen som tog det extra trycket. Det lägre lagret av jetinjekteringen utsattes då för ännu mer tryck när det övre lagret plockades bort, innan installationen av stämpan på nivå 10 påbörjades.

På grund av att alla stämp inte monterades med strävor ledde detta till att punkten där stämpan satt ihop med hammarbandet fick ta all stämpkraft, istället för att strävor hjälpte till att sprida ut lasten över en större yta av hammarbandet (COI,

2005). Detta ledde i sin tur till att lasten på kopplingen mellan stämp och hammarband var 30% högre än kopplingens designkapacitet. En annan faktor som kan ha påverkat hammarbandens bärförmåga är slitsmurens rotation som konsekvens av dess underdimensionering.

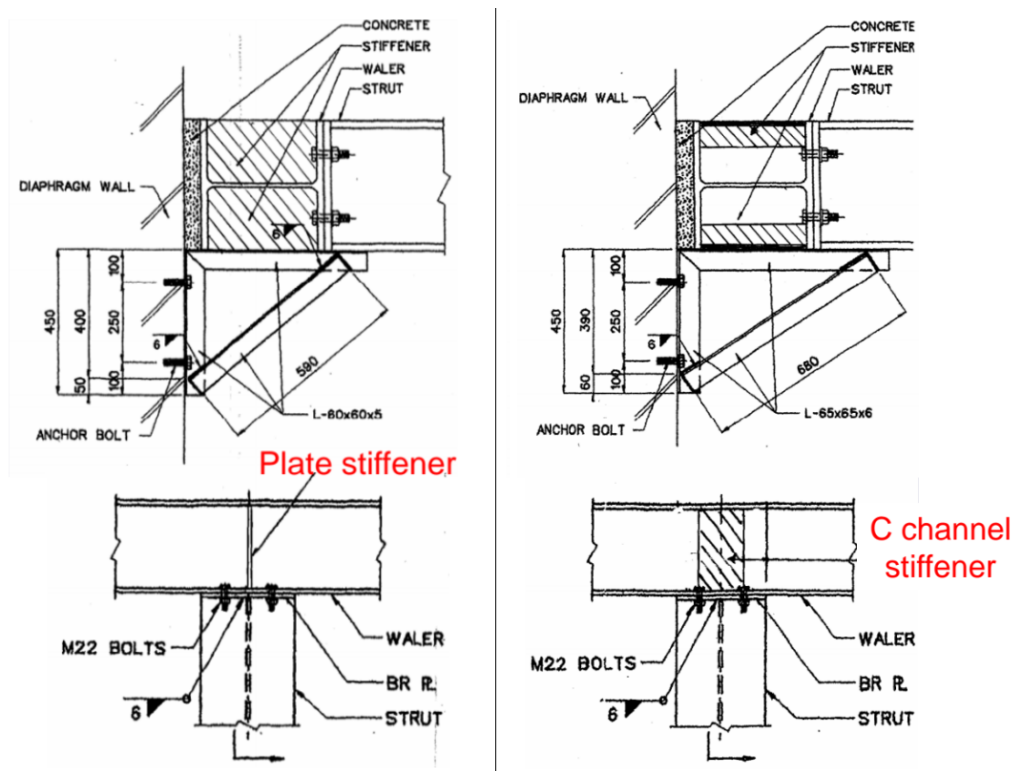
En utredning av jetinjekteringen gjordes efter kollapsen. Det visade sig att man inte hade vågat utföra jetinjektering nära området där elkabeln korsade schaktet, då man var orolig att detta kunde skada kabeln (Ng, 2021). Detta påverkade jetinjekteringens stabilitet och försämrade dess effektivitet.

Vid pågående utgrävning märkte man att vissa livavstyvningar hade bucklat (Ng, 2021). Man trodde det berodde på att mer kraft överfördes via stämpens flänsar och att detta då ledde till att livavstyvningarna bucklade. Det som troligtvis hände var att de bucklade på grund av en överskattning av hammarbandens lastfördelande längd med hänsyn till punktkraften från stämpet. Man ersatte då dessa livavstyvningar med UPE-balkar med resonemanget att de var större och skulle därför vara starkare, se figur 7.2 och 7.3. Vad man dock inte förstod var att UPE-balkarna skapar ett öppet styvhetssystem vilket gör hammarbandet svagt mot svängningar i sidled (eng.: side-sway). Detta beter sig mycket sprött vid brott vilket är mycket farligare då det plötsligt kan ge vika och kollapsa. Denna ersättningen anses vara en av de största och mest betydande misstagen som ledde till att kollapsen inträffade.

Figur 7.2: Foto av livavstyvning och UPE-balk



Kommentar. Foton från schaktet vid Nicoll Highway. Bilden till vänster visar en livavstyvning i ett hammarband, och bilden till höger visar hammarbandet efter att man ersatt en livavstyvning med en UPE-balk. Bild tagen från Committee of Inquiry. (2005). *Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004.* Singapore, Ministry of Manpower.

Figur 7.3: Ritning över livavstyvning och UPE-balk

Kommentar. En ritning över hur livavstyvningarna (vänster) och UPE-balkarna (höger) var monterade i hammarbanden. Bild tagen från Committee of Inquiry. (2005). *Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Work-site that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004*. Singapore, Ministry of Manpower.

7.2 Övervakning av utgrävningen

Under utgrävningen av schaktet hade man bland annat inklinometrar som mätte slitsmurens horisontella rörelser (COI, 2005). Dessa varnade redan två månader innan kollapsen att något inte stod rätt till. Man mätte mycket större utåtbuktningar än vad som beräknats och flera stämp hade behövts förstärkas då de börjat ge vika. Bland annat initierades utåtbuktningar på stämplnivån 9 som resulterade i en lastomfördelning till andra stödkonstruktioner (Jerman & Masin, 2021). Många av dessa mätare avlästes inte dagligen under kritiska moment i utgrävningen (COI, 2005). Dessutom fanns inte tillräckligt med mätinstrument för att kunna få en tillräcklig helhetsbild av situationen. Utöver detta hade töjningsmätarna på stämpan vid stämplnivå 7 monterats efter “pre-loading”, vilket ledde till en underskattning av den faktiska lasten som stämpan på den nivån tog. Närmare kollapsen började man även höra knakande ljud från stödkonstruktionen; något som inte togs på allvar (Ministry of Manpower [MOM], 2005). Det var väldigt dålig säkerhet på platsen: man tog medvetet risker under konstruktionen genom att ignorera tecken på potentiella faror, som till exempel slitsmurarnas stora utåtbuktningar. Säkerhetsprotokoll

följdes inte och den allmänna säkerhetskulturen bland involverade verkade vara svag (MOM, 2005).

TVå stycken “Back Analyses” (BA) genomfördes under arbetets gång (COI, 2005). En BA var vad konstruktören valde att kalla det krav i kontraktet för byggnationen, som sa att de var tvungna att omvärdera deras design om något mätinstrument visade värden som överskred ett uppskattat maxvärde. Resultatet av dessa analyser var att man utökade den maximalt tillåtna utåtbuktningen av slitsmurarna istället för att anse dimensioneringen som fel. Vid första BA ändrade man designnivån från 145mm till 253mm, detta efter att man hade uppmätt utåtbuktningar på 153mm någon vecka innan. Vid den andra BA ändrade man från 253mm till 359mm, detta dagen innan kollapsen inträffade och man hade uppmätt utåtbuktningar på 302mm några veckor innan. På dagen då kollapsen inträffade mätte man en utåtbuktning på 441mm som då överskred det nyligen reviderade maxvärdet. Experter menar att analyserna var “geotekniskt bristfälliga” och att arbetet efter den andra BA inte borde tillåtits fortskrida (MOM, 2005).

7.3 Säkerhetskultur

Enligt rapporten om kollapsen vid MRT från undersökningskommittén för Ministry of Manpower i Singapore (2005) visade det sig att riskidentifiering ej skedde under arbetets gång. Det fanns inte heller rutiner för att minimera och undvika risker innan de uppstod. I rapporten finns ett flertal punkter som alla tyder på att säkerhetskulturen över lag var bristande i projektet. Några av anledningarna vara följande:

- Nödplaner och direktiv för riskhantering var bristande
- Det fanns ingen “stop working order” vilket är ett juridiskt bundet direktiv som kan ges för att pausa all aktivitet
- Den mänskliga faktorn var många gånger en risk, vilket grundar sig i misslyckanden i organisationen i stort
- Provisoriska byggnationer/element hanterades inte med samma respekt som de permanenta byggdelarna
- Kommunikationen mellan parterna var ineffektiv och ibland oklar

8

Konsekvenser efter kollapsen

Efter kollapsen var gas, vatten och elledningarna ur funktion och ca 15 000 människor och 700 företag i områdena Marina Bay och Suntec City var utan ström (Ahmad, 2017). Hyresgäster och boende i det närliggande Golden Mile Complex evakuerades. Omedelbart efter kollapsen blockerade polisen Independence Bridge och alla vägar i anslutning till Nicoll Highway. Vägavstängningar påverkade tusentals pendlare som var tvungna att använda alternativa vägar för att ta sig in och ut ur staden. Kollektivtrafiken hade också omletts. Motorvägen öppnades upp för trafikanter igen sju månader efter kollapsen.

Ett par dagar efter kollapsen satte staten i Singapore ihop en så kallad “Committee of Inquiry” vars uppgift var att undersöka och komma fram till vad som hade orsakat olyckan (Ahmad, 2017). Den slutgiltiga rapporten publicerades den 10:e maj 2005, alltså ungefär ett år efter kollapsen inträffade. Den innehöll vad kommittén hade funnit var de största misstagen som bidrog till incidenten och även rekommendationer för hur sådana händelser kan undvikas i framtiden. Två år efter kollapsen gav även Ministry of Manpower ut *Workplace Safety and Health Act*(2005) i syfte att minimera olyckor på arbetsplatser i byggbranschen överlag.

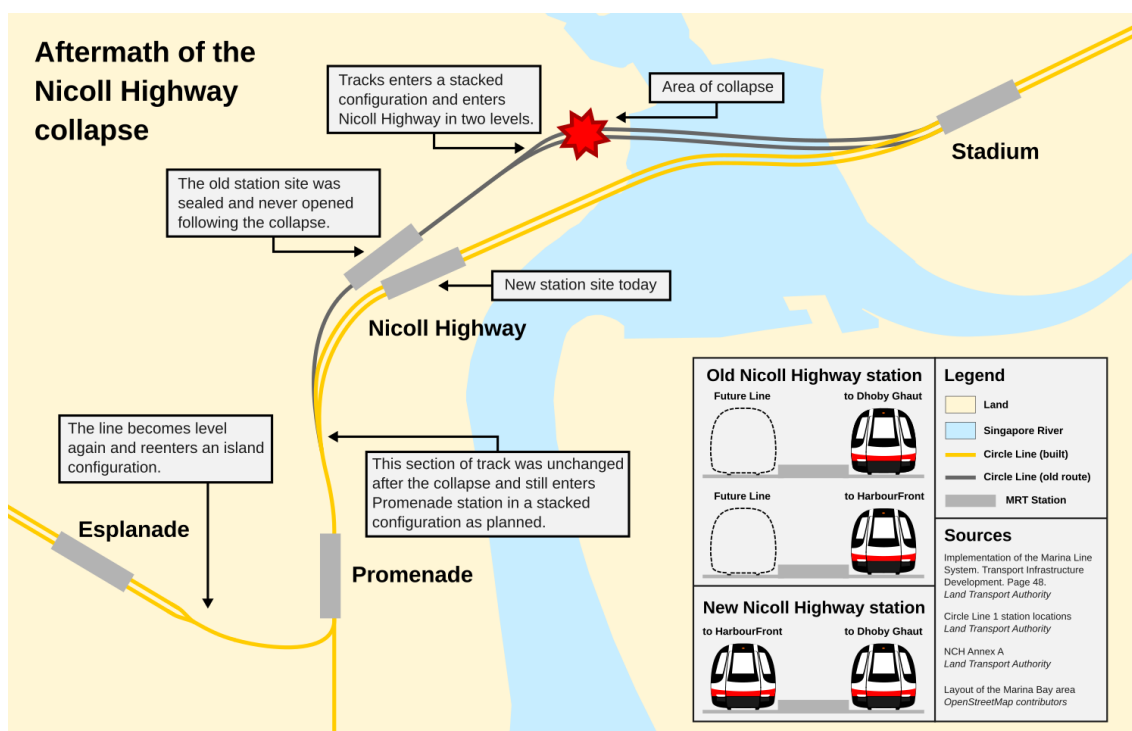
Flera kurser i Plaxis har lärts ut i Singapore som en konsekvens av kollapsen vid Nicoll Highway (Endicott, 2015). Ännu mer sofistikerade modelleringar har dock också börjat användas i Singapore med hjälp av Plaxis, där det finns exempel från byggprojekt som visar på att dessa program fortfarande kan bli missförstådda. Ett sådant exempel var att en designer för ett projekt utförde en “coupled consolidation analysis” (CCA), men också en odränerad och dränerad analys i enighet med lokala regelverk (Endicott, 2015). Resultatet blev att CCA hamnade mitt emellan den odränerade och dränerade analysen och det blev diskussioner om skillnaden mellan CCA och den dränerade analysen. Experter från andra delar av världen blev engagerade, och tillslut visade det sig, flera år senare, att skillnaden hade att göra med att designern hade använt olika randvillkor för de olika analyserna. Detta är bara ett exempel på hur dessa mer komplicerade applikationerna av Plaxis kan bli missförstådda.

8.1 Samhälleliga kostnader

Familjerna till de fyra männen som omkom i kollapsen fick 30 000 Singapore dollar (SGD) i kompensation av byggföretaget Nishimatsu-Lum Chang (Lee, 2019). Utöver detta fick de 380 000 SGD i ersättning och över 630 000 SGD från offentliga

donationer. Bidragen var till för att upprätthålla familjernas ekonomiska situation fram tills år 2019 då barnen skulle vara tillräckligt stora för att kunna arbeta. Tre chefer från Nishimatsu och en projektledare från Land Transport Authority blev åtalade i domstol och bötfälldes mellan 8 000 och 160 000 SGD vardera på grund av kollapsen (C. Tan, 2008). Företaget Nishimatsu bötfälldes också till 200 000 SGD enligt fabrikslagen för designfelen som var en bidragande faktor till kollapsen. Innan kollapsen ägde rum var MRT-banan nästan klar. Kollapsen ledde till att företaget Nishimatsu fick betala ytterligare 300 miljoner SGD för att lägga om Circle Line och bygga en ny station, se figur 8.1. Efter kollapsen sa flera personer upp sig från

Figur 8.1: Planvy över den gamla och nya MRT-rutten



Kommentar. En karta som visar den gamla tänkta MRT-rutten, och den nya, efter kollapsen. Från “NHC collapse map”, av Seloloving, 2021, Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NCH_collapse_map.png). CC BY-SA 2.0.

företaget Land Transport Authority och cheferna från Nishimatsu ersattes. Totalt sätt var kostnaderna från kollapsen hundratusentals miljoner SGD. Det var inte bara byggnationen vid Nicoll Highway som berördes ekonomiskt, utan ett 20-tal andra pågående schaktarbeten stängdes tillfälligt ner för att säkerställa att konstruktionerna var säkra och att en liknade kollaps inte skulle ske igen (Levey, 2008). Detta resulterade till stora kostnader i samband med förseningar och förändringar som gjordes i de projekten.

9

Diskussion

Det kan finnas många olika anledningar till att en olycka av den här typen tillåts att hända trots diverse tydliga tecken på att en kollaps är på väg att ske. Det kan vara aspekter kopplade till allt från ekonomi och arbetsmiljö till kultur och okunskap....

9.1 Orsakerna till kollapsen och möjliga åtgärder

En bidragande sak till kollapsen var den felaktiga modelleringen av lerans beteende med Metod A. En åtgärd för att förhindra sådana allvarliga fel är att använda sig av geotekniker som är kunniga inom området, speciellt vid en så pass stor utgrävning. Förståelse för modeller är en förutsättning för säker dimensionering.

Hänsyn togs inte till krökningen av schaktet vid designen av slitsmurarna. Detta orsakade att murarna blev försvagade och att hammarbanden inte var kontinuerliga längs väggen. Detta var ett misstag som ledde till svagheter i stödkonstruktionen. En självklar åtgärd till detta är att ta geometri i beaktning och anpassa designen. En annan åtgärd till slitsmurens försvagning på grund av krökning skulle kunna ha varit att ha en större marginal när det kommer till dess tjocklek för att kompensera för de större krafter som kan tillkomma vid en krökt slitsmur. När det kommer till åtgärder för hammarbanden, så kan krökta hammarband användas som följer slitsmurens linjedragning. Det viktiga är att planera rätt i förväg, något som alltså inte gjordes under denna utgrävning.

Inte nog med att hammarbanden var diskontinuerliga, de saknades även på vissa ställen, och stämpan fästes direkt in i slitsmuren. Stämp som monterades utan strävor utsatte hammarbanden för dubbelt så stora laster än vad de var designade för. De monterade stämpan tillsammans med jetinjekteringen utsattes redan för mer tryck än vad de var designade för eftersom det passiva jordtrycket inte var tillräckligt. För att öka det passiva jordtrycket kan slitsmurarna vara djupare ner i marken. Om slitsmurarna varit monterade enligt dimensioneringen, tre meter ner i alluviumlagret, hade krafterna på stämp och jetinjektering minskat.

Som en åtgärd för de överbelastade hammarbanden ersattes de bucklade livavstyvningarna med UPE-balkar som skapades ett öppet styvhetsystem och i sin tur försvagades hammarbanden att ta emot krafterna i sidled. Anledningen till detta kan tänkas vara missbedömningen av den bakomliggande orsaken till buckling i första hand.

Något som också skapade problem var elkabeln som gick tvärs genom schaktet. Detta orsakade en diskontinuitet i slitsmurarna, vilket försvagade stödkonstruktionen. Anledningen till varför kabeln inte kunde flyttas eller kopplas om framgår inte ur undersökningar. Något som skulle kunna ha gjorts var att förstärka stödkonstruktionen i området runtom där elkabeln gick genom att till exempel montera fler stämp där. Detta kunde ha kompenserat för försvagningen i konstruktionen som följd av diskontinuiteten i slitsmurarna.

Alla sektioner av slitsmuren var inte tillräckligt djupt ner i den äldre alluviala avlagringen. Dessa skulle nå ett djup på cirka tre meter ner i den äldre alluviala avlagringen. Från ritningar framgår att slitsmuren inte alltid utfördes till djupet. Anledningen till detta är oklar men det kan tänkas vara på grund av det varierande djupet på alluviumlagret eller på grund av fel under byggnation. Ett exakt avgörande på djupet på alluviumlagret före monteringen av varje slitsmur kan varit svår att bedöma, men borde gjorts. Indelningen av den alluviala avlagringen utefter vittrade zoner och hur kompakt lagret är, tyder på att slitsmurar djupare ner i marken hade kunnat vara mer gynnsamt. Slitsmurarna hade kunnat ge mer stabilitet ifall de hade nåt ner till den djupaste avlagringen av alluviumlagret(Cz).

Det fanns ett antal problem kopplat till jetinjekteringen. Till att börja med antog man att injekteringslagret var 3 m tjockt vid FE-analysen, fast det var föreskrivet en tjocklek på endast 2,6 m enligt ritning. Jetinjekteringen var även gjord av ett för sprött material på grund av felaktiga proportioner i cementblandningen. Åtgärder till dessa problem skulle kunna sammanfattas som att det behövs en bättre kommunikation, då det verkar som att dessa problem kan ha uppkommit som ett resultat av missuppfattningar och bristande kommunikation. En annan åtgärd är användning av korrekt design och eventuellt val av material som inte uppträder sprött vid brott.

9.2 Djupa kontra grunda schakt

Vid schaktarbeten förekommer stora risker där den främsta skaderisken för arbetarna kopplas till klämskador från jordmassor, stenar, tunga maskiner eller liknande (Lundström m. fl., 2015). Denna risk uppmärksammas sannolikt mer vid djupa schakter trots att det är minst lika troligt för olyckor att förekomma vid grunda. Att täckas av 1m jord i samband med ett schaktras är jämförbart med att klämmas av 2 ton, vilket är tillräckligt för orsaka vitala skador. Detta gör att allvarliga olyckor kan förekomma vid nästan alla schaktarbeten och leder till mellan ett och två dödsfall i Sverige varje år i Sverige (Samuelsson, 2007).

Förstudierna för ett schaktarbete är relativt komplicerade då många olika aspekter behöver tas i beaktning. En schaktningsmodell kan inte implementeras som standard utan arbetet skiljer sig mycket beroende på de lokala geotekniska förhållandena (Lundström m. fl., 2015). Vid byggnation i jord är en aspekt att materialets egenskaper enbart kan testas via stickprov till skillnad från andra byggnadsmaterial som stål där egenskaperna är väl kända. Det är således viktigt att, oavsett schaktets djup

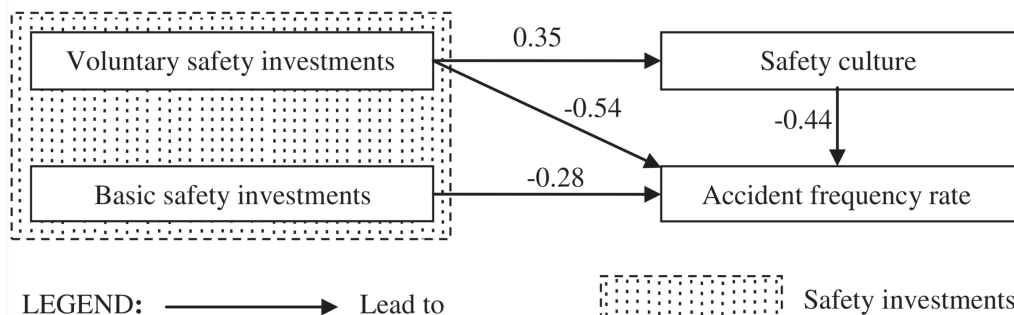
och omfattning, det finns en ansvarig med tillräcklig geoteknisk kompetens. Utöver svårbedömda egenskaper är också jord känslig för förändring på grund av väder, vibrationer, ändringar i grundvattennivån med mera.

9.3 Säkerhetskultur och riskhantering

En vanlig definition av säkerhetskultur är

“The safety culture of an organisation is the product of individual and group values, attitudes, perceptions, competencies and patterns of behaviour that determine the commitment to, and the style and proficiency of, an organisation’s health and safety management. Organisations with a positive culture are characterized by communications founded on mutual trust, by shared perceptions of the importance of safety and by confidence in the efficacy of preventive measure” (ACSNI, Human Factors Study Group, 1993)

vilket i princip innebär att en blandning av varje individs värderingar och attityd gentemot säkerhet skapar en säkerhetskultur. I Singapore har byggbranschen stått för cirka 30-40 procent av dödsfallen på arbetsplatser från 2006 till 2021 (Ministry of Manpower, 2006, 2021). Dödsfallen har totalt gått ner men andelen inom byggsektorn har ingen stadigt nedgående riktning, utan branschen är i behov av övergripande arbete med säkerhetskultur. Det finns olika svårigheter med säkerhetskultur och Feng m.fl lyfter frågan om effekten av säkerhetsutrustning i sin rapport *Exploring the interactive effects of safety investments, safety culture and project hazard on safety performance* (2013). I rapporten utvärderas hur mängden säkerhetsutrustning påverkar kulturen och säkerhetstänk bland byggarbetare. De drar slutsatsen att för större byggprojekt, så som MRT, kan en större grad av säkerhetsutrustning leda till att arbetares förväntningar på säkerheten höjs och deras eget säkerhetstänk sjunker vilket kan leda till ett mer vårdslöst beteende. Detta innebär att säkerheten på ett projekt inte nödvändigtvis förstärks enbart genom säkrare utrustning. Feng m.fl beskriver också hur information och aktiviteter om säkerhet förstärker säkerhetskulturen hos personalen, vilket i sin tur påverkar säkerheten på byggarbetsplatsen. Ett annat sätt att motivera säkerhetstänk är att erbjuda frivillig säkerhetsutrustning vilket redovisas i figur 9.1. Figuren visar hur frivillig säkerhetsutrustning har en positiv påverkan på säkerhetskulturen vilket i sin tur har en minskande effekt på mängden olyckor. Säkerhetskultur har en större påverkan på mängden olyckor än vad endast obligatorisk säkerhetsutrustning har. Som tidigare nämnt var säkerhetskulturen bristfällig i byggnationen om MRT. Framförallt var kommunikationen bristfällig vilket kan vara ett bakomliggande problem till ett flertal av orsakerna till kollapsen då bristande kommunikation kan grunda sig i en kulturell struktur. I Singapore och större delar av Asien har undersökningar gjorts om rädslan för att misslyckas (fear of failure, FOF). Detta sker på flera typer av plan och studier har gjorts bland annat inom elitidrottande, inom entreprenörskap och bland studenter (Chua¹ & Bedford, 2016; Schinke, 2012; A. Tan, 2019). Att kommunikationen var bristfällig under byggnationen av MRT kan bero på att man inte velat erkänna sina misstag och därav hanterat problemet på egen hand, eller inte alls. Ett exempel på detta är förstärkningen av hammarbanden med UPE-balkar där endast en ingenjör var inblandad och gjorde en felbedömning vilket förvärrade situationen.

Figur 9.1: Säkerhetsutrustnings påverkan på mängden olyckor

Kommentar. Indirekta och direkta effekter av säkerhetsutrustning samt frivillig säkerhetsutrustning på mängden olyckor. Hämtad från Feng, Y., Teo, E. A. L., Ling, F. Y. Y. & Low, S. P. (2013). Exploring the interactive effects of safety investments, safety culture and project hazard on safety performance: An empirical analysis. *Project Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.10.016>

Detta misstaget hade kunnat undvikas med fler erfarna ingenjörer inblandade. Den bristande kommunikationen i samband med rädslan för att misslyckas kan vara en bidragande faktor till kollapsen och ett strukturellt problem som behöver hanteras. Gällande säkerhetskulturen kan det vara nödvändigt med mer informerande kurser inom säkerhet för att sprida kunskap. Enligt tidigare nämnd studie kan även frivillig säkerhetsutrustning ha en positiv effekt på säkerhetskulturen vilket är en enkel åtgärd att implementera på byggprojekt.

I det stora hela är det omöjligt att ersätta en människa med pengar utifrån ett etiskt perspektiv och därmed är det viktigt att alla arbetsplatser jobbar för att förhindra olyckor. Alla personer på en arbetsplats har rätt till en trygg och säker arbetsmiljö. Kollapsen vid Nicoll Highway resulterade i högre samhälls- och produktionskostnader samt dödsfall. För att motverka detta kan Singapore, och andra länder, ta del av Sveriges arbetsätt som bland annat innefattar att en riskbedömning ska genomföras i projekteringen, det vill säga vilka risker som finns i entreprenadskedet samt att åtgärdförslag ska tas fram (Arbetsmiljöverket, 2022). Detta ska tas fram av alla projekterande discipliner i ett projekt. Riskbedömningarna och åtgärdförslagen ska sedan sammanställas av en person som är byggarbetsmiljösamordnare i en arbetsmiljöplan. I entreprenadskedet ska arbetsmiljöplanen sättas upp på en lättillgänglig plats där alla entreprenörer kan ta del av den. Arbetsmiljöplanen ska alltid vara uppdaterad efter de arbetsmoment som är aktuella. På detta sättet fördelas ansvaret för riskbedömningar över flera personer vilket leder till att fler olyckor kan förutses.

I Sverige är det lag att registrera sig med ID06 på en byggarbetsplats (ID06, u. å). Det är ett system för att förenkla säkerheten och är ett olycksförebyggande arbete för att känna till och kontrollera vilka personer som vistas på arbetsplatsen, men också för att hålla koll på vilka säkerhetsinstruktioner varje individ har fått. Hade ett sådan system införts i Singapore skulle detta möjligen medföra att fler tar del

av säkerhetsinstruktioner och olyckor skulle troligtvis minimerats.

I Sverige har också AFA Försäkringar utvecklat ett informationssystem om Arbetsmiljö (IA) (afaförsäkring, u. å). IA-systemet är till för att hantera avvikelser inom arbetsmiljön för att fånga upp förbättringsförslag på en arbetsplats. I systemet kan alla i samma bransch ta del av varandras utredningar, arbetsmiljöhändelser och åtgärder som sker på arbetsplatsen vilket leder till att företag lär sig av andras erfarenheter när det gäller säkerhet på arbetsplatsen. Det har visat sig att användare som använder IA-systemet har färre antal olyckor, risker och tillbud på arbetsplatserna. Eftersom IA-systemet ger en stor överblick av arbetsplatsen, leder detta till att alla medarbetare är aktiva och kan ta del av arbetsmiljöutvecklingen. Systemet har även digitala checklistor för exempelvis skyddsronder och riskanalyser vilket leder till att mycket av riskhanteringen synliggörs för att minimera olyckor. Det största syftet med IA-systemet är att alla på arbetsplatsen ska rapportera risker och tillbud för att minska olyckor. Om ett liknade system hade använts i Singapore hade kollapsen troligtvis inte skett. Eftersom många såg brister i konstruktionen men de redogjordes inte tillräckligt för att stoppa arbetet. Fördelen med systemet är också att högsta ledningen kan ta del av allt som rapporteras vilket gör det lättare att sätta stopp för ett arbete som kan leda till en olycka. Som tidigare nämnt har undersökningar i Singapore visat att många har en rädsla av att misslyckas (FOF) (Chua¹ & Bedford, 2016). Med IA-systemet hade denna rädslan minskat eftersom systemet är till för att synliggöra risker och tillbud, vilket leder till att säkerhetskulturen skulle förändras och fler skulle våga redogöra de risker och tillbud som finns.

9.4 Vem bär ansvaret?

När det gäller valet av Metod A vid dimensioneringen av stödkonstruktionen anses det ha att göra med Plaxis-manualens utformning (COI, 2005). Experterna menar att den kunde missuppfattas av en geotekniker med bristande kunskap vilket var vad som skedde vid dimensioneringen av MRT. Man påpekar dock att det troligtvis inte var meningen av författaren av Plaxis-manualen att rekommendera denna metod vid dessa förhållanden. I stället anser vissa experter att analyser gjorda med finita elementmetoden borde ske med tillsyn av en person som både är erfaren med att använda FEM och som har en stor kunskap om geoteknik. Andra experter menar dock att ansvaret ligger på geoteknikern och att man inte ska använda dennes bristande kunskaper som en ursäkt. Enligt vår mening har skaparna till Plaxis ett visst ansvar när det kommer till att förmedla hur deras produkt ska användas. Plaxis är ett program som modellerar stabilitet, deformationer med mer i jordmassor, vilket är modellering av verkligheten som kan generera stora konsekvenser vid felanvändning. Då ett flertal experter ansett att manualen lätt kan missuppfattas, är antagandet om Metod A inte nödvändigtvis ett handhavandefel även om det hade kunnat undvikas av en mer erfaren geotekniker. Plaxis har, enligt vår mening, ett visst ansvar i att ledsaga deras kunder i användandet av deras produkt på rätt sätt.

Vilket ansvar har då geoteknikern/konstruktören? Det är inte dennes ansvar att hitta ett byggprojekt som ligger inom sitt kunskapsspann, utan det är dennes chef

som bör känna till geoteknikerns begränsningar. Vid ett såpass stort byggprojekt som detta bör det även vara flera geotekniker/konstruktörer inblandade som kan kontrollera och stötta varandra. Geoteknikern med de bristande kunskaperna hade kunnat lägga lite mer tid på att förstå bakgrunden till Plaxis istället för att hantera det som en "black box" där parametrar stoppas in och hållfasthetsvärden kommer ut. Geoteknikern kanske tyckte att han var på rätt spår och att han hanterade projektet på korrekt sätt genom att använda programmet som han gjorde. Däremot om det var så att geoteknikern var osäker kring programmet och behövde stöd kan fear of failure ha hindrat han från att be om hjälp. Rädslan för att be om hjälp kan ha grundats i att tyda på att man själv inte har tillräckligt med kunskap och erfarenhet för att genomföra projektet. Denna faktor kan därmed sammanfattas som ett misslyckande och det är något som bör undvikas. Sedan kan det också ha varit så att geoteknikern helt enkelt inte visste att han inte hade tillräckliga kunskaper. Att han inte var tillräckligt erfaren för att inse att detta var utom hans kunskapsområde. Det är därför det är viktigt att ha flera geotekniker som samarbetar, och som kan märka om något inte verkar stämma. En annan faktor kan ha varit att geoteknikern var under tidspress. För att bli klar i tid hade han kanske inte tillräckligt med tid att förstå sig på programmet eller fråga någon om en annan persons åsikt och perspektiv.

Bristerna gällande övervakning på byggarbetsplatsen är svår att hitta källan till. Även om de flesta övervakningsfelen lätt skulle kunna skyllas på byggarbetarna/ingenjörerna, så har det troligtvis mer att göra med omständigheterna på arbetsplatsen. Det kan till exempel bero på trånga deadlines; att man hellre fortsätter gräva än att spendera tid på att kontrollera alla väggar och stämp vid varje moment i utgrävningen. Det kan också bero på, som diskuterats innan, säkerhetskulturen. Detta är dock ingen ursäkt eftersom ingenjörerna har ett stort ansvar och det är deras ansvar att övervaka byggarbetsplatsen. Även om instrumenten fanns, så fanns kanske inte medvetenheten om konsekvenserna av att inte ta mätningarna på allvar. Man skulle också kunna tänka sig att "fear of failure" kan vara en orsak, och att man helt enkelt inte vågade rapportera in de oroväckande mätvärdena utan istället hoppades på att bli klar så fort som möjligt innan något hände. Kommunikation kan även vara en del i övervakningsbristerna, där dålig dialog mellan arbetarna och ledningen kan ha lett till att ingen riktigt visste eller förstod hur allvarlig utvecklingen av situationen verkade vara.

Vid de allra flesta projekt av denna storlek spelar ekonomin en stor roll i de beslut som tas. I Singapore används en variant av offentlig upphandling som är en blandning mellan offentlig och centraliserad upphandling (Jones, 2002). Prissänkningar och nedskärningar där de kan göras kommer som en följd av offentlig upphandling då olika företag konkurrerar om projektet. I och med detta kan den ekonomiska aspekten ha stor påverkan på slutprodukten då vissa delar av projektet planeras och utförs på ett undermåligt sätt. Om detta kombineras med en okunskap på de beslutsfattande posterna kan projektet redan från start vara planerat på ett sådant sätt att ett ras eller en katastrof är ofrånkomligt med de resurser som innefattas i budgeten.

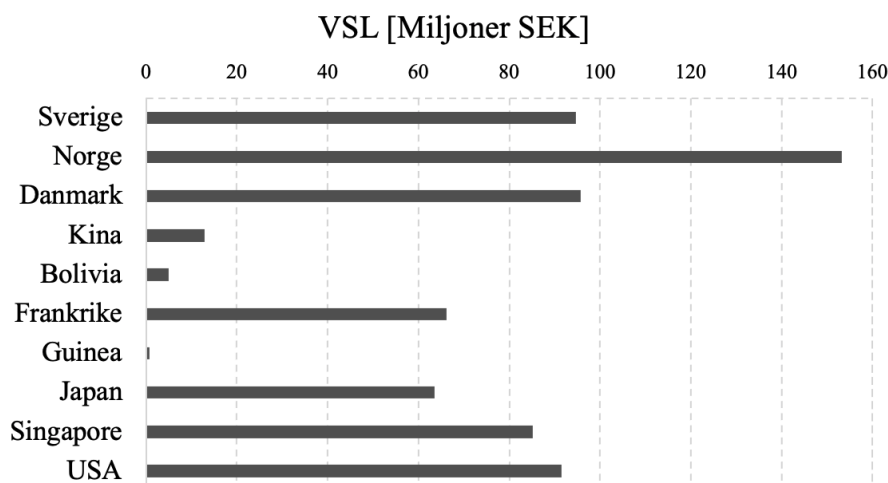
Vi menar att det inte går att peka ut en enskild person som orsak till vad som skedde, utan att det snarare är ett övergripande fel i organisationen som helhet vilket främst beror på kultur och kommunikation. Man kan dessutom se från nationaliteterna på de som omkom i kollapsen att detta var ett projekt där det fanns arbetare från flera olika länder (COI, 2005). Detta kan ha skapat ytterligare kommunikationsproblem då många troligtvis var tvungna att prata ett språk som inte var deras modersmål, vilket kan ha lett till missuppfattningar och feltolkningar. Är det då rimligt att ge fängelsestraff till vissa personer som man upplever vara ansvariga? Man skulle kunna säga att det som hände tekniskt sett är deras ansvar, men samtidigt var det troligtvis inte medvetna fel, utan kanske mer mänskliga misstag orsakade av till exempel stress och press. Kollapsen sägs dock kunna ha undvikits, och fyra personer omkom i olyckan. Någon måste kunna hållas ansvarig rent juridiskt. Så även om vi upplever att det är mer rätt att skylla på organisationen av arbetet som helhet och den allmänna arbetskulturen i Singapore, så förstår vi att detta inte fungerar i praktiken. Någon eller några måste bli ekonomiskt och juridiskt ansvariga för vad som skedde. Familjerna till de som omkom och även allmänheten i stort vill också se åtgärder och konsekvenser för dessa sortens olyckor, så att man kan känna att detta inte ska hända igen. Byggföretaget vill troligtvis också visa att de tar avstånd från "någon" som kan ha orsakat misstaget. Detta för att skydda sitt eget rykte och tydligt visa att de genomför förbättrande åtgärder. Alla begår misstag, men när misstagen leder till sådana förödande konsekvenser så kan man kanske inte vara lika överseende längre.

9.5 Värdet på ett människoliv

I Singapore fick familjerna till de fyra männen som omkom ersättning som skulle räcka till att försörja familjerna tills att barnen blev stora. Familjerna fick 410 000 dollar i ersättning från byggföretagen och 630 000 dollar av donationer (Lee, 2019). Totalt fick familjerna en summa på 1 040 000 dollar, det framgår inte i källan om summan är fördelad på de fyra familjerna. När ett dödsfall inträffar i Sverige på grund av arbetsskada kan den efterlevande få efterlevandelivränta (Pensionsmyndigheterna, 2021). Livräntan är till för att ersätta försörjningen som den bortgångna bidrog med till hushållet. Den räntan beräknas ut efter vilken arbetsinkomst personen hade vid dödsfallet upp till 7,5 prisbasbelopp men högst 362 250 kronor per år tills personen skulle fyllt 65 år. Detta är mycket mer ersättning än vad familjerna till männen som omkom i Singapore fick. Dock bör hänsyn tas till att det är en ersättning som ges ut idag i Sverige medans olyckan i Singapore skedde år 2004. Förutom livräntan har Trafikverket gjort en uppskattning av värdet av ett statistiskt liv (L baserat på att minska risken för trafikolyckor. Detta värde tas fram genom att undersöka människors betalningsvilja för att minska risken för dödsfall. Enligt Trafikverket är ett människoliv värt cirka 44 miljoner kronor (Trafikverket, 2020) vilket är en ökning från tidigare värde på cirka 22 miljoner kronor (Elmvret, u. å). Detta värde gäller alltså för värdering vid dödsfall inom trafiken och det finns olika metoder att använda som kan ge olika utslag vid beräkning av VSL. Inom sjukvård beräknas också värdet av ett människoliv vilket har resulterat i ett något lägre värde än inom trafik. VSL beräknas även olika för olika länder. I W. Kip Viscusi och Clayton J

Masterman studie *Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life* (2017) har en metod att beräkna VSL använts för olika länder. Resultatet från deras studie stämmer inte riktigt överens med Trafikverkets uppskattning av VSL men den är användbar för att se skillnaden mellan olika länder. Figur 9.2 visar VSL i miljoner kronor för olika länder där Sverige och Singapore ligger på ungefär samma nivå. Ett mönster är att VSL tenderar att anta ett lägre värde i u-länder men vi ser samtidigt att Kina ingår i de länder med lägre VSL. Författaren till studien poängterar att de lägre VSL-värdena kan bero på bristande indata snarare än att ett människoliv värdesätts mindre. Figuren visar att VSL-värdet för Singapore är ungefär 85 miljoner kronor, vilket motsvarar cirka 12 miljoner dollar. Ersättningen som familjerna till de omkomna fick var långt ifrån tillräckligt enligt dagens värdering. Att ett människoliv värderas lågt kan ha varit en ytterligare faktor till den bristande säkerheten på arbetsplatsen. Det vill säga att en låg värdering på ett människoliv tyder på att säkerhet inte prioriteras vilket kan ha varit en orsak till att utförandet av projektet genomfördes utan betydande hänsyn till riskerna som arbetarna utsattes för. Detta är viktigt att uppmärksamma för att försäkra en social hållbarhet på arbetsplatser och i samhället.

Figur 9.2: VSL för olika länder



Kommentar. Värdet av ett statistiskt liv (VSL) i miljoner kronor för olika länder baserat på studien Viscusi, W. K. & Masterman, C. J. (2017). *Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life*. Vanderbilt Law School. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/bca.2017.12>

9.6 Förebyggande olyckshantering

Det är viktigt att sprida informationen om varför en olycka har skett för att det inte ska upprepas. Kollapsen vid Nicoll Highway ledde till att flera schaktarbeten pausades för att säkerställa att fel inte hade begåtts på flera arbetsplatser likt de felen som orsakade kollapsen. Detta är ett praktexempel på konsekvenser av vad

som händer när man enbart följer manualen till ett program utan att ha en större förståelse för bakgrundsteorin. Inom geoteknik är det viktigt att varje enskilt fall granskas specifikt och ett misstag i dimensioneringen är svårt att upptäcka innan skadan är skedd. Lärdomen av den är viktig och leder till att granskningar sker och projektering tar hänsyn till detta. En annan lärdom som går att ta från dimensioneringsprocessen är att en grupp med flera personer som arbetar tillsammans och stödjer varandra kan sannolikt göra bättre bedömningar under arbetets gång, samt att brister kan åtgärdas från flera perspektiv.

10

Slutsats

Denna rapport har utfört en analys av händelseförloppet och orsakerna till kollapsen vid Nicoll Highway. Bakomliggande orsaker vid dimensionering, utförande och övervakning har utretts samt dess konsekvenser. Det har resulterat i en diskussion om konkreta, men också sociala, och andra bakomliggande orsaker. Diskussionen har även täckt etiska aspekter, så som värdet av ett människoliv och kulturella strukturer. Sammanfattningsvis kan man konstatera att det var många faktorer som orsakade kollapsen vid Nicoll Highway. Som författare av denna rapport konkluderar vi orsakerna i följande punktlista.

- Felbedömmningar vid beräkningen av odränerad skjuvhållfasthet enligt Metod A och B.
- Vissa stämp monterades utan strävor samt utan hammarband.
- Hammarbanden var diskontinuerliga utmed slitsmursväggarna.
- Slitsmuren gjordes grundare än vad dimensioneringen antog.
- Lagren av jetinjekteringen gjordes tunnare än vad dimensioneringen antog, samt att jetinjekteringen var gjort av ett för sprött material.
- Jetinjekteringen utfördes inte tillräckligt nära området runt elkabeln.
- Dålig kontroll av övervakning.
- Felmontering av viss mätutrustning.
- Inga åtgärder vidtogs även om deformationer i stödkonstruktionen uppstod tidigt i byggskedet.
- Den maximalt tillåtna utåtbuktningen av slitsmurarna utökades under projektets gång istället för att notera den felaktiga dimensioneringen.
- Riskbedömmningar och åtgärdsförslag genomfördes inte under projektets gång.
- Säkerhetskulturen inom byggbranchen var bristande i Singapore.

För att återknyta till syftet med rapporten följer här de övregripande lärdomar man fått av kollapsen. Vid större byggprojekt som detta ligger stor tyngd i att förstå bakgrundsteorin, framförallt vid användning av jordmodeller. Genom att se en modell som en "black box" där ett resultat kommer ut, finns det inget kritiskt moment som kan detektera felet. Att tillsätta endast en ingenjör för dessa beräkningar är också naivt, återigen, när det kommer till att vara kritisk till beräkningsgången. Beräkningar och beslut bör genomföras i samråd med flera ingenjörer. Då är det också viktigt att kommunikationen mellan dem är rak och tydlig eftersom konsekvenserna vid en olycka kan bli förödande. När riskerna är stora måste säkerheten tas på extra stort allvar och följas med stor respekt. Att upplysa om risker gör byggarbetare mer medvetna om sin omgivning och vad som kan vara en potentiell fara, vilket gör

att varningstecken tas på allvar och ordentliga åtgärder görs i ett tidigare stadie.

Det är viktigt att poängtera att även om schaktet i denna olycka var djupt, så måste säkerheten beaktas oberoende om man arbetar i djupa eller grunda schakt. Detta då det är lätt att underskatta farorna som även finns vid grunda schakter. Risken för allvarliga olyckor vid grunda schakt är minst lika troliga som vid djupa schakt, så samma säkerhetsåtgärder och rutiner bör implementeras i båda fallen.

Alla projekt har en utsatt tid för när arbetet måste vara färdigt och det är förståeligt att man vill hålla sig innanför dessa tidsramar. Dels för att det är en deadline men också för att inte behöva betala förseningsavgifter. Däremot ska tidspress och extra kostnader inte vara en faktor till bristande säkerhet på en arbetsplats. Det aktuella MRT-projektet gick inte som planerat då det uppstod flera störningar med konstruktionen under arbetets gång. Detta bidrog med ytterligare tidspress och vilja att bli färdig innan det sker större problem som inte kan undvikas. Istället för att försöka åtgärda problemen på bästa sätt användes temporära, kortsiktiga lösningar i hopp om att hinna klart innan något hände. Det är självklart inte ett korrekt arbetssätt att ignorera problem i förhoppningen att undvika att lägga tid och pengar på åtgärder. Med detta riskerar man alla arbetarnas liv och eventuellt ännu större kostnader för samhället. Säkerhet på arbetsplatsen är väsentlig för allas trygghet men även för att arbetet ska kunna utföras korrekt utan någon tidspress.

Ansvar för olyckan ligger i grunden inte på någon enskild person eller en begränsad grupp med människor, utan snarare på organisationsnivå som helhet, till följd av en bristande kommunikation och säkerhetskultur. Även om detta stämmer finns det dock fortfarande anledning att lägga ansvaret på en specifik grupp med människor, nämligen projektledningen. Detta då det var de som skulle sett till så att organisationen fungerade och att det fanns en aktiv kommunikation mellan de olika parterna i projektet.

Det mest tragiska med kollapsen vid Nicoll Highway var att den kunde ha undvikits under flera skeden i processen om det bara hade funnits en fungerande kommunikation och säkerhetskultur. En sådan tragedi får inte hända igen, vare sig om det gäller djupa eller grunda schakter.

Litteratur

- Abbaslou, H., Hadifard, H. & Ghanizadeh, A. R. (2020). *Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03462>
- ACSNI, Human Factors Study Group. (1993). *Organising for safety* (3:e upplagan). Health; Safety Commission.
- afaförsäkring. (u. å). *IA-systemet*. <https://www.afaforsakring.se/forebyggande/ia/information-om-ia-systemet/>
- Ahmad, N. (2017). Nicoll Highway collapse. *Singapore Infopedia*. https://eresources.nlb.gov.sg/infopedia/articles/SIP_430_2004-12-17.html?s=nicoll
- Arbetsmiljöverket. (2022). *Byggarbetsmiljösamordnare*. <https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/bygg/ansvar-vid-byggnads--och-anlaggningsarbete/byggarbetsmiljosamordnare/>
- Artola, J. (2005). *A Solution to the Braced Excavation Collapse in Singapore*. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology.
- Bo, M. W., Arulrajah, A., Sukmak, P. & Horpibulsuk, S. (2015). *Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi*. Japanese Geotechnical Society.
- Chua¹, H. S. & Bedford, O. (2016). A Qualitative Exploration of Fear of Failure and Entrepreneurial Intent in Singapore. <https://doi.org/10.1177/0894845315599255>
- Committee of Inquiry. (2005). *Report of the Committee of Inquiry Into the Incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004*. Singapore, Ministry of Manpower.
- Dahlblom, O. & Persson, K. (2019). *Samverkansgrundläggning med JET Grouting*. <https://www.geoteknik.lth.se/utbildning/examensarbete-civiling/lediga-examensarbeten/samverkansgrundlaeggning-med-jet-grouting/>
- Elmvret, M. (u. å). De värdesätter livet i kronor och ören. *Lundajournalister*. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4253254&fileId=4253266>
- Endicott, L. J. (2015). *Design and Construction of Excavations in an Urban Setting –Lessons Learnt from Failures*. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong University of Science and Technology. <https://docplayer.net/59141413-Design-and-construction-of-excavations-in-an-urban-setting-lessons-learnt-from-failures.html>
- Ergun, M. U. (2008). *Deep Excavations*. Ankara, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.

- Feng, Y., Teo, E. A. L., Ling, F. Y. Y. & Low, S. P. (2013). Exploring the interactive effects of safety investments, safety culture and project hazard on safety performance: An empirical analysis. *Project Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.10.016>
- Gang, C. J. (2012). *Geology of Singapore*. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf
- Hallowell, M. (2012, 5. september). *At-rest, active, and passive earth pressure*. <https://www.youtube.com/watch?v=RC6-LJphzW4>
- ID06. (u. å). *Vad är syftet med ID06?* <https://id06.se/support/vad-ar-syftet-med-id06/>
- Jerman, J. & Masin, D. (2021). *Evaluation of hypoplastic model for soft clays by modelling of Nicoll highway case history*. Czech Republic, Charles University. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X21000562#b0015>
- Jon. (2014). *Construction methodologies*. <https://thomson-line.blogspot.com/2014/05/construction-methodologies.html>
- Jones, D. S. (2002). *Procurement Practices in the Singapore Civil Service: Balancing Control and Delegation*. PrAcademics Press.
- Karlsrud, K. & Andresen, L. (2008). *Design and performance of deep excavations in soft clays*. Norwegian Geotechnical Institute.
- Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2012). *Craig's Soil Mechanics* (8:e upplagan). Spoon Press.
- Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2020). *Craig's Soil Mechanics* (9:e upplagan). CRC Press.
- Lee, J. (2019). Remembering the hero of Nicoll Highway collapse whose body was never found. *Mothership*.
- Levey, D. (2008). IAP class probes Singapore highway collapse. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Lundström, K., Odén, K. & Rankka, W. (2015). *Schakta Säkert - Säkerhet vid schaktning i jord*. Stockholm, Svensk Byggtjänst.
- Ministry of Manpower. (2005, 13. maj). *Committee of Inquiry Concludes String of Critical Design Errors Caused Collapse at Nicoll Highway*. <https://www.nas.gov.sg/archivesonline/data/pdfdoc/20050513987.pdf>
- Ministry of Manpower. (2006). *Occupational Safety and Health Profile*. Singapore. <https://www.mom.gov.sg/-/media/mom/documents/safety-health/reports-stats/wsh-profile/osh-profile-2006.pdf>
- Ministry of Manpower. (2021). *Workplace Safety and Health Report*. Singapore. <https://www.mom.gov.sg/-/media/mom/documents/safety-health/reports-stats/wsh-national-statistics/wsh-national-stats-2021.pdf>
- Ng, H. Y. (2021). Revisiting Lessons Learned from the Nicoll Highway Collapse. *MIStructE*.
- Pensionsmyndigheterna. (2021). *Ersättning vid arbetsrelaterat dödsfall*. <https://www.pensionsmyndigheten.se/forsta-din-pension/ekonomiskt-stod/ersattning-vid-arbetsrelaterat-dodsfall>
- Rose, A. (2021). Introduction to Direct Simple Shear Testing. <https://www.vjtech.co.uk/blog/introduction-to-direct-simple-shear-dss-testing>

- Saman Pey Co. (u. å). *Jet Grouting and Deep Soil Mixing*. <https://samanpey.com/our-services/jet-grouting-and-deep-soil-mixing?lang=en>
- Samuelsson, B. (2007). *Schakt och Gropar*. Sveriges Byggindustri.
- Schinke, R. (2012). *Athletic insight's writings in sport psychology*. Nova Science Publishers.
- Seloloving. (2021). *NHC collapse map*. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NCH_collapse_map.png
- Shahir, H. & Alavinezhad, S. P. (2020). *Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c- ϕ soil with surcharge*. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-09-2019-0269/full/html>
- Sin, W. K. (2004). *Lessons Learned from The Nicoll Highway Incident*. <http://smces.org.sg/wp-content/uploads/2014/10/nicoll-highway-incident-22-october-2014.pdf>
- Skempton, A. W. The $\phi = 0$ analysis of stability and its theoretical basis. I: 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Rotterdam, 21–30 juni 1948).
- Statens Geotekniska Institut. (1995). *Sättningsegenskaper i lös lera på grund av geologisk avsättning och "åldring"*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300344/FULLTEXT01.pdf>
- Statens Geotekniska Institut. (2008). *Jords egenskaper*. <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>
- Statens Geotekniska Institut. (2019, 11. januari). *Stödkonstruktioner*. <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/stodkonstruktioner/>
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik* (5:e upplagan). Cremona Förlag vid Chalmers tekniska högskola.
- Tan, A. (2019). Singapore students fear failing more than their overseas counterparts.
- Tan, C. (2008). Nicoll Highway collapse: Insurance claims settled. *Aisaone*.
- Trafikverket. (2020). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0*. https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-2021/09_trafiksakerhet_a7.pdf
- Webster Technologies. (u. å). *Diaphragm Walls*. Hämtad 10 mars 2022, från <https://www.webstertechnologies.co.uk/wp-content/uploads/Diaphragm-Wall.jpg>
- Whittle, A. J. & Davies, R. V. Nicoll Highway Collapse: Evaluation of Geotechnical Factors Affecting Design of Excavation Support System. I: International Conference on Deep Excavations (Singapore, 28–30 juni 2006).
- Wikipedia. (2008). *Singapore map*. https://sv.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Singapore_map.svg
- Viscusi, W. K. & Masterman, C. J. (2017). *Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life*. Vanderbilt Law School. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/bca.2017.12>
- Zhou, Y. (2009). *Geology of Singapore* (2:a upplagan). Defence Science; Technology Agency.

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS