



LUND
UNIVERSITY



KLIMAT- OCH KOSTNADSANALYS ÖVER STÅLSPONT OCH SLÄNTNING

MARIA BÄRRING och JOSEFIN THORESSON

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--20/5067--SE (1-81) | ISSN 0349-4977

MASTER'S DISSERTATION

KLIMAT- OCH KOSTNADSANALYS ÖVER STÅLSPONT OCH SLÄNTNING

MARIA BÄRRING och JOSEFIN THORESSON

Supervisor: **NILS RYDÉN**, Associate Professor, Div. of Engineering Geology, LTH | Peab Anläggning AB.

Assistant Supervisor: Dr **ERIKA TUDISCO**, Div. of Geotechnical Engineering, LTH, Lund

Examiner: Professor **OLA DAHLBLOM**, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund.

Copyright © 2020 Geotechnical Engineering,
Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, June 2020 (PI).

For information, address:

Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.

Homepage: www.geoteknik.lth.se

Abstract

The Swedish Transport Administration together with some other of the stakeholders within the construction sector has set up a goal to reduce greenhouse emissions with 50 % until the year 2030 compared to 2015. In infrastructure projects, the major part of the emissions comes from transportation of excavated material. The handling of the excavated material is often inefficient and soil that is not polluted is sometimes sent for deposit when it could have been reused.

The purpose of this thesis is to briefly investigate the retaining structures sheet piles, secant piling and slurry walls as temporary structures in clay, and different types of soil reinforcement for clay. Thereafter, one type of retaining structure is chosen and compared with the method of sloping. The methods were designed geotechnically and then an economic and environmental evaluation was made. For the calculations, a reference project in Gothenburg was used, where Peab is the contractor and The Swedish Transport Administration is the owner. In the area around Gothenburg the major part of the ground consists of soft clay, which sets up high demands geotechnically and the material is also difficult to reuse.

A reference section was chosen from the reference project and numbers were collected in order to make geotechnical calculations. When choosing the retaining structure the depth of the shaft is crucial and for the depth of the reference section, which was 4 meters, braced sheet piles were chosen. Geotechnical designing was made for each method and then compared environmentally and economically. The environmental calculations were made with The Swedish Transport Administration's tool Klimatkalkyl which is based on the method of life cycle assessment. The economical analysis was made with assistance from from Peab and the results were that sheet piling was somewhat more expensive but still comparable to sloping.

In the first step of the climate calculation, the volume of the excavated material was considered. The results were that sheet piles where of less volume than slope which led to lower gas emissions. Whether the sheet piles can be reused or not also has a considerable influence on the climate impact. The tool Klimatkalkyl has limitations, for example it does not consider the impact of transportation of material to the construction site. If a more reliable result is required, life cycle assessment would be better since it considers several circumstances.

Reuse of the excavated material at construction sites close by would be beneficial environmentally. Detailed investigation for this has not been made in this report, but examples that were proposed were construction bricks made of clay or reuse as rammed earth.

In conclusion, the main factor for climate impact is the distance to deposit from the construction site. This is important to consider when choosing retaining structure in projects in order to reduce the climate impact.

Sammanfattning

Trafikverket har tillsammans med andra aktörer inom bygg- och anläggningssektorn bland annat satt upp som mål att utsläpp av växthusgaser ska minska med 50 % år 2030 jämfört med år 2015. I anläggningsprojekt utgör transport av schaktmassor den största delen av utsläppen. Ofta är dessutom hanteringen av massor ineffektiv då även rena massor som hade kunnat återanvändas transporteras till deponi.

Syftet med detta examensarbete är att översiktligt utreda stödkonstruktionerna stålspont, sekantpålning och slitsmur som temporära stödkonstruktioner i lera, samt olika jordförstärkningsmetoder för lera. Därefter valdes en stödkonstruktion som jämfördes med släntning. Dessa alternativ dimensionerades och utvärderades sedan miljömässigt och ekonomiskt. För undersökningarna har ett referensprojekt i Göteborg använts, där Peab är entreprenör och Trafikverket är beställare. I området kring Göteborg består en stor del av marken av lös lera, vilket ställer höga krav ur ett geotekniskt perspektiv och denna kan dessutom vara problematisk att återanvända.

En referenssektion valdes från referensprojektet och värden hämtades från denna för de geotekniska beräkningarna. För val av stödkonstruktion har schaktdjupet avgörande betydelse och för referenssektionens schaktdjup på 4 meter valdes stämpad stålspont. Geoteknisk dimensionering utfördes för respektive metod och sedan jämfördes de två alternativen ur både klimat- och kostnadsperspektiv. Klimatberäkningarna gjordes med hjälp av Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl vilket grundar sig i metoden för livscykelanalys. Kostnadsanalysen, vilken gjordes med stöd från Peab, visade att spon-ten var något dyrare men ändå jämförbar mot slänt.

I klimatkalkylen togs det i första skedet endast hänsyn till mängden schaktmassor. Resultatet visade att spont ger upphov till mindre volym schaktmassor jämfört med släntning vilket gav en mindre klimatbelastning. Huruvida spon-ten kan återanvändas spelar också stor roll avseende klimatbelastning. Verktöget Klimatkalkyl är begränsat och tar bland annat inte hänsyn till transport av material till och från arbetsplat-sen. Skulle ett mer noggrant resultat eftersträvas är livscykelanalys en mer tillförlitlig metod då denna tar hänsyn till fler aspekter.

Återanvändning av den lera som schaktas i närbelägna projekt skulle varit fördelaktigt ur miljösynpunkt. Utförliga undersökningar för detta har inte gjorts detta arbete, men som förslag finns exempelvis byggblock bestående av lera eller återanvändning av lera i rammed earth.

Som slutsats kan det dras att det som har störst inverkan på klimatbelastningen är avståndet till deponi från arbetsplatsen. Detta är därför av stor vikt att överväga vid val av stödkonstruktion i projekt för att minska klimatbelastningen.

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den sista delen av vår utbildning på civilingenjörsprogrammet inom Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet genomfördes under våren 2020 i samarbete med Peab Anläggning AB.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Nils Rydén som gjort detta examensarbete möjligt genom att alltid ställa upp då det behövts och ge bra handledning. Vi vill också tacka de personer från Peab som engagerat sig i vårt examensarbete: Anton Gunnebrink, Anders Engström och Sandra Roberts. Tack även till vår biträdande handledare Erika Tudisco som varit ett stort stöd inom geoteknik-delen.

Avslutningsvis vill vi tacka varandra för gott samarbete och en fantastisk studietid tillsammans. Nu väntar nya utmaningar för oss båda inom anläggningsbranschen!

Lund, maj 2020

Maria Bärning och Josefin Thoresson

Notation

Latinska bokstäver

B - schaktbredd
 c - kohesion
 c_u - odränerad kohesion
 c_{ud} - dimensionerande odränerad kohesion
 F_c - säkerhetsfaktor
 h - höjd på jordlager
 G_k - karakteristisk egentyngd
 G_d - dimensionerande egentyngd
 d - avstånd från D-nivå till schaktdjup
 H - schaktdjup
 N_{cb} - faktor för bärförmåga
 z - djup
 q - linjelast
 q_d - dimensionerande linjelast
 Q_k - karakteristisk variabel last
 Q_d - dimensionerande variabel last
 P_{ad} - aktivt jordtryck
 P_{pd} - passivt jordtryck
 p_{net} - nettojordtryck
 u - porvattentryck
 W - jordvikt
 e_W - avstånd till gravitationspunkt

Grekiska bokstäver

γ - tunghet
 γ' - effektiv tunghet
 γ_d - partialkoefficient för säkerhetsklass
 γ_G - lastberoende partialkoefficient
 γ_Q - lastberoende partialkoefficient
 γ_M - partialkoefficient
 γ_{M0} - partialkoefficient
 σ_z - vertikalspänning
 σ'_z - effektiv vertikalspänning
 σ_n - normalspänning
 τ - skjuvspänning
 $\gamma_{S;da}$ - modellfaktor
 $\gamma_{R;da}$ - modellfaktor

$\gamma_{R;dp}$ - modellfaktor

$\gamma_{Sd,Ncb}$ - modellfaktor

η - omräkningsfaktor för spontkonstruktion

φ - friktionsvinkel

Innehåll

Abstract	I
Sammanfattning	III
Förord	V
Notation	VII
Innehåll	XII
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Frågeställningar	1
1.4 Metod	2
1.5 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Lera	3
2.1.1 Göteborgslera	3
2.2 Släntstabilitet	3
2.3 Spontstabilitet	5
2.4 Jordtryck	5
2.5 Mohr-Coulombs brottkriterium	5
2.6 Dimensionering	6
2.6.1 Dimensionering av spont	8

2.6.2	Dimensionering av slänt	11
2.7	Miljö	13
2.7.1	Livscykelanalys	13
2.7.2	Klimatkrav och klimatbonus	15
2.8	Masshantering	15
3	Stabilisering av schaktslänt	19
3.1	Stödkonstruktioner	19
3.1.1	Sekantpålning	19
3.1.2	Slitsmur	21
3.1.3	Stålspont	22
3.2	Jordförstärkning	24
3.2.1	Dränering	24
3.2.2	Jetinjektering	24
3.2.3	Kalkcementpelare	25
3.2.4	Masstabilisering	25
4	Referensprojekt E45 Lilla bommen - Marieholm	29
4.1	Referenssektion	30
5	Metod	33
5.1	Geoteknisk analys	33
5.1.1	Laster	33
5.1.2	Spont	33
5.1.3	Slänt	35
5.2	Miljöpåverkan	36
5.3	Kostnader	37
5.4	Känslighetsanalys	38

6	Resultat	41
6.1	Geoteknisk analys	41
6.1.1	Spont	41
6.1.2	Slänt	41
6.2	Miljöpåverkan	42
6.2.1	Klimatbelastning för masshantering	42
6.2.2	Klimatbelastning för återanvänd spont	42
6.3	Kostnader	42
6.4	Känslighetsanalys	43
7	Analys	45
7.1	Val av stödkonstruktion	45
7.1.1	Geoteknisk analys	45
7.2	Miljöpåverkan	46
7.3	Kostnader	46
7.4	Känslighetsanalys	47
7.4.1	Spont	47
7.4.2	Masshantering	48
7.5	Förbättring av Klimatkalkyl	48
7.6	Värdering av klimatpåverkan	49
8	Alternativ masshantering	51
8.1	Återanvändning av lera inom och utanför entreprenaden	51
8.2	Compressed Stabilized Earth Brick	52
8.3	Rammed earth	52
8.4	Lera i stödkonstruktioner	53
8.5	Stabilisering av lera	53

8.6 Byggnadsmaterial av bränd lera	54
9 Slutsats	57
10 Vidare studier	59
Litteratur	61
A Spontdimensionering	67
B Släntanalys	71
C Trafikverkets Klimatkalkyl	73

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Enligt Boverket (2020) stod bygg- och fastighetsbranschen för nästan en femtedel av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser år 2017. En rad aktörer inom bygg- och anläggningssektorn, däribland Trafikverket, har som mål att minska utsläpp av växthusgaser som uppkommer i samband med projekt med 50 % år 2030, jämfört med år 2015 (Fossilfritt Sverige, 2018). För att detta mål ska kunna uppnås bör nya miljövänligare metoder utvecklas. I husbyggnadsprojekt står transporterna till och från arbetsplatsen för omkring 20 % av utsläppen, i jämförelse med infrastrukturprojekt där transporterna kan stå för majoriteten av alla utsläpp som uppkommer i projektet (Fossilfritt Sverige, 2018). En stor del av det material som transporteras bort är schaktmassor. Förorenade massor måste transporteras bort för deponi, men i dagsläget deponeras även stora mängder rena massor. Detta leder till en ineffektiv hantering av massorna med ökade kostnader för transporter som följd, vilket i sin tur leder till ökade utsläpp av växthusgaser (Fossilfritt Sverige, 2018). Återanvändning av befintliga massor kan vara ett sätt för att minska miljöbelastningen och göra hanteringen mer effektiv (Statens geotekniska institut, 2019b).

På ett projekt i centrala Göteborg som Peab utför på uppdrag av Trafikverket har omkring 300 000 kubikmeter lös lera transporterats till deponi (Peab, UÅ). Detta är både kostsamt samt bidrar till utsläpp av växthusgaser. Om det är ekonomiskt hållbart att välja en stödkonstruktion där mindre mängd schaktmassor behöver transporteras bort kan detta vara av intresse för både beställare och entreprenör.

1.2 Syfte

Rapportens syfte är att översiktligt utreda stödkonstruktioner i lera och sedan jämföra två av dessa ur ett hållbarhetsperspektiv och ett ekonomiskt perspektiv. Det utreds också hur lermassor kan återanvändas.

1.3 Frågeställningar

- Vilka stödkonstruktioner är lämpliga att använda i lera och vilka faktorer spelar in vid val av stödkonstruktion?
- Vilken stödkonstruktion av slänt och spont är mest lönsam miljömässigt för vald referenssektion och är denna metod ekonomiskt försvarbar?

- Vilka parametrar är avgörande för klimatbelastningen och hur kan denna bedömas?
- På vilka sätt kan masshantering genom återanvändning av lokala lermassor utföras?

1.4 Metod

I rapportens första del beskrivs den teori som ligger till grund för arbetet samt litteraturstudie över några typer av stödkonstruktioner. Peabs projekt E45 Lilla bommen - Marieholm används som referensprojekt, där en referenssektion med data från projektet används. Utifrån denna görs geotekniska beräkningar med hjälp av beräkningsprogram för metoderna spont och slänt. Därefter görs en jämförelse av klimatbelastning och kostnader för respektive teknisk lösning. För bedömning av klimatbelastning används Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl och kostnader hämtas internt från Peab Anläggning och Peab Grundläggning. Resultaten analyseras och utvärderas sedan för att slutsatser avseende metodval för stabilisering av schaktslänt ska kunna dras. I rapportens avslutande del görs en studie över alternativ masshantering och huruvida lermassor kan återanvändas.

1.5 Avgränsningar

Stödkonstruktioner analyseras endast för huruvida de kan användas i lera. I klimatbelastningsanalysen beaktas endast utsläpp av koldioxidekvivalenter under byggskedet. Andra parametrar såsom energiåtgång, buller och partiklar tas inte hänsyn till i jämförelsen. Geoteknisk beräkning utförs endast på en vald referenssektion, medan vissa känslighetsanalyser utförs över hur resultatet förändras vid förändrade förutsättningar. Vid analys över hur alternativ masshantering, det vill säga hur schaktmassor kan hanteras mer effektivt, berörs endast jordarten lera.

2 Teori

2.1 Lera

En jord med benämningen lera består av mer än 40 viktsprocent finjord, det vill säga jord med en partikelstorlek mindre än 0,06 millimeter. På grund av den höga andelen finkornigt material i lera har jordarten stor förmåga att hålla kvar vatten. Detta ger långsam vattenströmning genom materialet (Statens geotekniska institut, 2019c). Permeabiliteten påverkar materialets dräneringsförmåga. Då lera har låg permeabilitet är dräneringshastigheten långsam, vilket innebär att det tar lång tid att nå maximal kapillär stighöjd (Statens geotekniska institut, 2019d).

Lera är en kohesionsjord. Kohesionsjord kännetecknas av att materialets hållfasthet byggs upp av kohesion mellan kornen, i jämförelse med friktionsjord där hållfastheten istället byggs upp av friktion mellan kornen. Den energi som krävs för kornen i en materialmassa att förskjutas är det som är avgörande för skjuvhållfastheten i materialet (Brons m. fl., 1985).

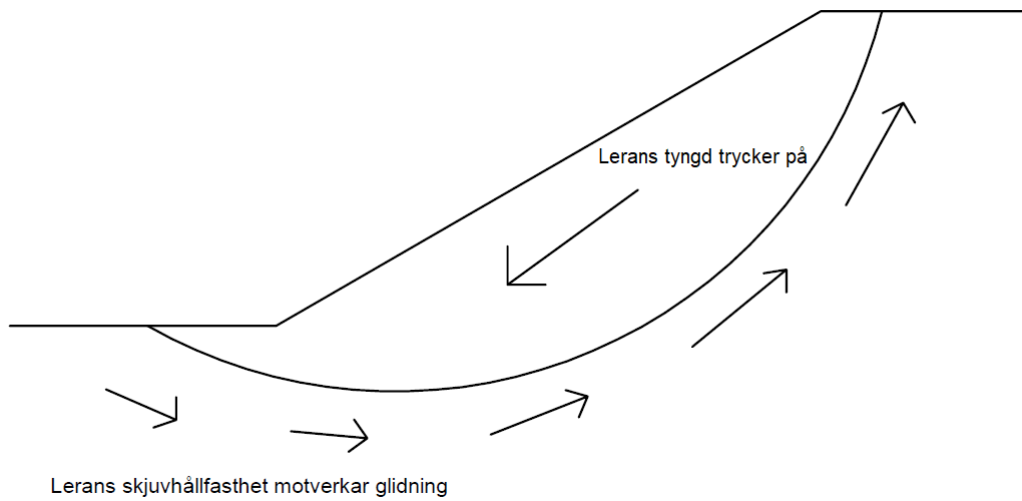
2.1.1 Göteborgslera

I området kring Göteborg består marken till stor del av lös lera med stor mäktighet, så kallad Göteborgslera. Egenskaperna hos denna medför risk för skred och stora sättningar (Björk, 2017). I området förekommer dessutom kvicklera. Kwicklera definieras enligt Trafikverket (2011) som lera med sensitivitet > 50 och omrörd odränerad skjuvhållfasthet $< 0,4$ kPa. Denna försämrar jordens hållfasthet och blir vid störning eller omrörning helt flytande. Exempel på störning som kan uppkomma vid ett bygg- eller anläggningsprojekt kan vara att ett litet skred sker, exempelvis vid en slänt. Följden av detta blir då att bakomliggande material också påverkas vilket utlöser ett större skred och stora områden riskerar att rasa. Det är därför viktigt att minimera risken för detta genom att kartlägga var kvickleran kan finnas när arbete utförs i dessa områden (Statens geotekniska institut, 2018).

2.2 Släntstabilitet

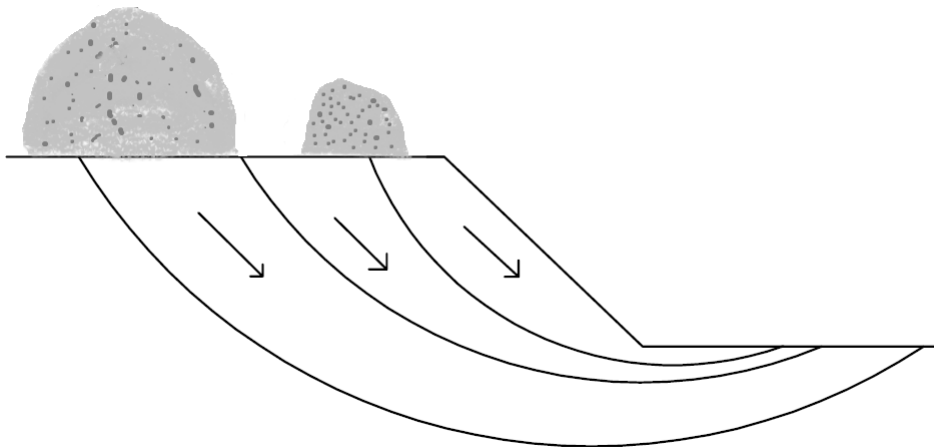
Släntstabilitet hos en kohesionsjord innebär dess förmåga att motstå skred. Vid släntbrott antas att cirkulär-cylindriska glidytor bildas (Axelsson, 2020). Skred bildas då pådrivande krafter från den påtryckande glidkroppen och från eventuella laster på släntkrönet överskrider den mothållande kraften, se Figur 2.1. Den mothållande kraften utgörs framförallt av lerans skjuvhållfasthet. Risken för skred vid schaktarbeten i lera ökar med ökande djup (Axelsson, 2020). I lera kan skred uppkomma redan vid mycket svag lutning i schaktslänten, kring 1:10 (Lundström m. fl., 2015). Skjuvhållfasthet i lera

minskar vid höga portryck vilket är direkt beroende av vatteninnehållet i materialet. På grund av avlastning och krypeffekter minskar också skjuvhållfastheten med tiden (Lundström m. fl., 2015).



Figur 2.1: Glidyta i lerslánt. Källa: Egen figur inspirerad av Lundström m. fl., 2015

Utöver släntstabiliteten är det viktigt att beakta omkringliggande laster vid schaktning i lera. Trots att schaktslánten bedöms vara tillräckligt stabil kan laster från exempelvis byggtrafik som verkar en bit ifrån schaktgropen ge upphov till skred eftersom totalstabiliteten då försämras (Lundström m. fl., 2015), se Figur 2.2



Figur 2.2: Upplag som till exempel masshögar nära schaktgropen kan ge bristande totalstabilitet. Källa: Egen figur inspirerad av Lundström m. fl., 2015.

Lera, särskilt kvicklera, är mycket känslig för vibrationer i marken vilket kan uppkomma till följd av till exempel sprängning eller omrörning. Vibrationer kan därför innebära en ökad risk för skred vilket bör beaktas vid schaktarbeten (Lundström m. fl., 2015). Risken för skred ökar också om leran innehåller sprickor, eftersom den

kraft som håller emot jordmassan försämras och glidyterna blir kortare. Om regn eller snösmältning förekommer minskar stabiliteten ytterligare, då sprickorna i leran vattenfylls och portrycket ökar (Lundström m. fl., 2015).

2.3 Spontstabilitet

Vid dimensionering av spont ska brottyperna bristande totalstabilitet, instabilitet i schaktbotten, rotationsstabilitet och konstruktionsbrott kontrolleras (Fredriksson m. fl., 2018). Instabilitet i schaktbotten kan uppstå när jordens hållfasthet överskrids. Det kan också uppstå genom hydraulisk bottenuppträckning, vilket kan uppstå när vattentrycket i det underliggande jordlagret blir så högt att detta lager trycker upp det överliggande, mindre permeabla, lagret. Detta förekommer främst vid övergångar mellan ett tunnare lager av lera och ett grovkornigare material (Lundström m. fl., 2015). Om lerlagret är tunt kan detta då inte hålla emot med sin egentygnd. På grund av denna risk är det av stor vikt att kontrollera grundvattenytans läge (Lundström m. fl., 2015).

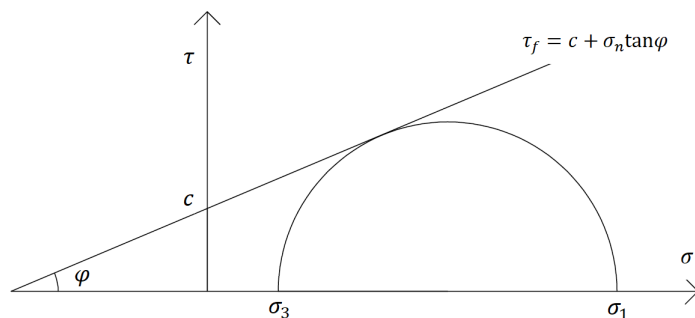
Rotationsinstabilitet sker då jordtrycket blir för högt mot schaktväggen så att sponten börjar rotera (Fredriksson m. fl., 2018). Konstruktionsbrott som kan uppstå i en spont är om spontens dimension är för klen, brott i stag till följd av för stor last, brott i stämp till följd av exempelvis tjäle, brott i förankringszon eller brott i hammarband (Fredriksson m. fl., 2018).

2.4 Jordtryck

Jordtrycksberäkning görs oftast med hjälp av Coulombs eller Rankines jordtrycksteorier. Rankines jordtrycksteori bygger på Coulombs teori och denna analyserar spänningsförhållanden i enstaka jordelement i brottgränstillstånd, det vill säga då jorden är i plastisk jämvikt (Jakobsson och Romero, 2010). I jämförelse med Coulombs jordtrycksteori, där hela jordvolymen analyseras, lämpar sig Rankines teori vid enklare beräkningar med mindre komplexa lastfall (Jakobsson och Romero, 2010). De förutsättningar som antas vid analys med hjälp av denna är bland annat att glidyterna är plana, att den bakomliggande fyllnaden består av friktionsjord, att aktivt tillstånd uppstår samt att ingen beaktning av kohesions- eller friktionskraft mellan vägg och jord sker (Jakobsson och Romero, 2010).

2.5 Mohr-Coulombs brottkriterium

Mohr-Coulombs brottkriterium är ett vanligt förekommande brottkriterium för jord, då skjuvhållfastheten är starkt beroende av normalspänningen i jord. Brottkurvan sätts, enligt Figur 2.3, till en rät linje och beräknas enligt räta linjens ekvation.

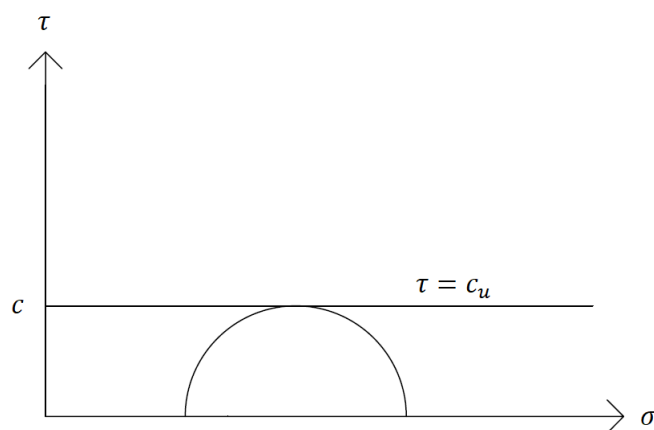


Figur 2.3: Mohr-Coulombs brottkriterium

Cirkelns storlek och läge bestäms med hjälp av de två huvudspänningarna, σ_1 och σ_3 , och brott sker när cirkeln tangerar brottkriteriets linje.

Permeabiliteten hos kohesionsjordar är låg och odränerade förhållanden råder oftast. Då tillämpas ekvation 2.1, se Figur 2.4.

$$\tau_f = c_u \quad (2.1)$$



Figur 2.4: Mohr-Coulombs brottkriterium för kohesionsjord

2.6 Dimensionering

Stabilitetsberäkningar i kohesionsjord baseras vanligen på odränerad skjuvhållfasthet (Alén m. fl., 2007). I normal- och svagt överkonsoliderad jord samt vid kortvarig belastning är den odränerade skjuvhållfastheten dimensionerande. I övriga fall beaktas även den dränerade skjuvhållfastheten (Alén m. fl., 2007).

Vid dimensionering används partialkoefficientmetoden för både spont och slänt. Detta innebär att fasta partialkoefficienter som tar hänsyn till osäkerheter, i både jord och geokonstruktion, appliceras på lasterna eller på lasteffekten. Genom detta säkerställs säkerhet mot brott (IEG, 2008b).

Design Approach

Enligt IEG (2008b) appliceras ekvationerna för geotekniska och övriga konstruktionslaster enligt en Design Approach. Det finns tre stycken, för stödkonstruktioner gäller Design Approach 3 (Fredriksson m. fl., 2018), se Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Design Approach 3

	Konst. laster	Geo. laster
Permanent ogynnsam last	$\gamma_d 1,35$	$\gamma_d 1,0$
Permanent gynnsam last	1,0	1,0
Variabel ogynnsam last	$\gamma_d 1,5$	$\gamma_d 1,4$
Variabel gynnsam last	0	0

Där γ_d är en koefficient som beror av säkerhetsklass vilket beskrivs nedan.

Omräkningsfaktor η

Omräkningsfaktorn, η , används för att beakta osäkerheter i jordens och geokonstruktionens eller släntens egenskaper (IEG, 2008b).

η beräknas som produkten av åtta delfaktorer enligt ekvation 2.2. η bör i normalfallet ligga mellan 0,90 och 1,1. Den totala faktorn begränsas till maximalt 1,2 (Fredriksson m. fl., 2018).

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 \eta_7 \eta_8 \quad (2.2)$$

$\eta_1 - \eta_4$ beaktar markens egenskaper och den marktekniska undersökningen.

$\eta_5 - \eta_6$ beaktar konstruktionens utformning och geometri.

$\eta_7 - \eta_8$ beaktar geokonstruktionens verkningssätt, där η_7 beaktar jordens verkningssätt (sprött eller segt) och η_8 beaktar aktuell parameters värde förhållandevis till andra lasteffekter.

Säkerhetsklass

Val av säkerhetsklass beror på hur stora konsekvenser för människor och omgivning som ett brott i konstruktionen skulle ge upphov till. Säkerhetsklassen anger vilket värde på γ_d som används i beräkningarna, se Tabell 2.2.

Tabell 2.2: Säkerhetsklasser

Säkerhetsklass	γ_d
1	0,83
2	0,91
3	1,0

Hållfasthetsparametrar

Dimensionerande värde för geotekniska parametrar bestäms enligt

$$X_d = \frac{X_k \eta}{\gamma_M} \quad (2.3)$$

där

X_d är dimensionerande värde på parameter

X_k är karakteristiskt värde på parameter

η är enligt omräkningsfaktor som beaktar osäkerheter, enligt ovan

γ_M är partialkoefficient för jord enligt Tabell 2.3.

Tabell 2.3: Partialkoefficienter för jordparametrar, γ_M

Jordparameter	Symbol	M1	M2
Effektiv kohesion, c'	$\gamma_{c'}$	1,0	1,3
Odränerad skjuvhållfasthet, τ_{cu}	γ_{cu}	1,0	1,5

2.6.1 Dimensionering av spont

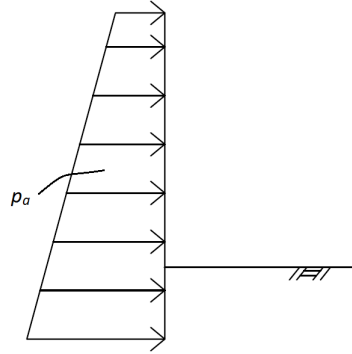
Vid spontdimensionering måste jordtryck beräknas. Ekvation 2.4 ger värdet på det vertikala jordtrycket σ_z i underkant på lager n .

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2.4)$$

På grund av jordtrycket på den sida av sponten utanför schaktgropen kommer sponten förskjutas mot gropen. Detta utgörs av det aktiva jordtrycket, se Figur 2.5. Det passiva jordtrycket uppkommer då sponten förskjuts från schaktgropen och verkar mot sponten (Tudisco och Dahlblom, 2017), se Figur 2.6. Vid dimensionering kontrolleras momentet kring en punkt, i detta fall stämpens läge, för att beräkna spontens längd nedanför schaktbotten. Detta för att säkerställa att det passiva jordtrycket blir tillräckligt stort, så att inga förskjutningar av sponten uppstår.

Aktivt jordtryck i lera beräknas enligt

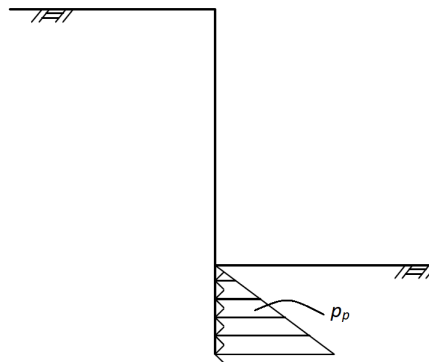
$$P_{ad} = \gamma_{S;da}(\sigma_z - 2c_{ud}) \quad (2.5)$$



Figur 2.5: Aktivt jordtryck mot spont

Passivt jordtryck i lera beräknas enligt

$$P_{pd} = \gamma S;dp(\sigma_z + 2c_{ud}) \quad (2.6)$$

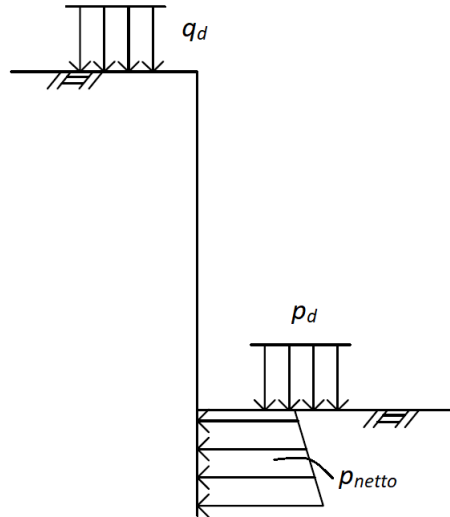


Figur 2.6: Passivt jordtryck mot spont

Nettojordtrycket är skillnaden mellan aktivt och passivt jordtryck. När jorden under schaktbotten består av lera beräknas nettojordtrycket enligt

$$P_{net,d} = \gamma Sd;NcbN_{cb}c_{ud} - (\gamma H + q_d) \quad (2.7)$$

Detta istället för att beräkna differensen mellan det aktiva och det passiva jordtrycket (Fredriksson m. fl., 2018), se Figur 2.7.



Figur 2.7: Nettojordtryck mot spont.

Modellfaktorer vid spontdimensionering

Efter att jordtryck beräknats införs ett antal modellfaktorer som beaktar jordtryckets storlek och fördelning (IEG, 2008b). Dessa faktorer bestäms enligt Fredriksson m. fl. (2018):

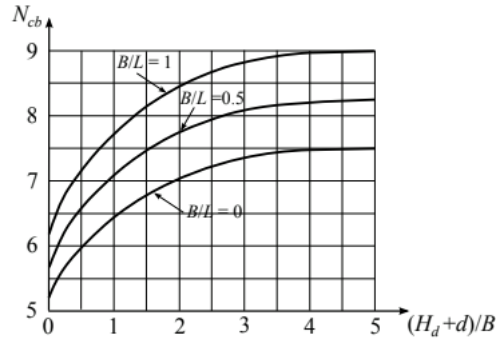
$\gamma_{S;da}$ och $\gamma_{R;da}$ är modellfaktorer som beaktar osäkerheten i beräkningsmodellen. I det normala fallet är dessa 1,0 men vid vissa omständigheter ändras värdet för dessa.

$\gamma_{S;da}$ multipliceras med den totala nettokraften på aktiv sida. Denna kan få ett högre eller lägre värde på grund av exempelvis tjälrisk och sprängning i närheten av schakten.

$\gamma_{R;dp}$ multipliceras med den totala nettokraften på passiv sida. Denna faktor kan likt $\gamma_{S;da}$ ökas eller minskas beroende på olika omständigheter.

$\gamma_{S;d,Ncb}$ är en modellfaktor som används vid beräkning av nettojordtrycket i ekvation 2.7 för att ta hänsyn till osäkerheter. Denna sätts till vid normala förhållanden till 1,0.

N_{cb} är faktor för bärförmåga och denna beror på schaktens geometri. Värde på faktorn avläses i Figur 2.8.



Figur 2.8: Bestämning av faktor för bärförmåga, källa: Tudisco och Dahlblom (2017)

där H_d är schaktdjup, B är schaktens bredd och d är längd på den del av spanten som befinner sig under schaktdjupet.

Dimensionering av stämp

Vid bestämning av stämpens c/c -avstånd kontrolleras hammarbandets momentkapacitet mot horisontell hammarbandslast.

Hammarbandets momentkapacitet ges av

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} f_{yd} \quad (2.8)$$

(Fredriksson m. fl., 2018), där W_{pl} är plastiskt böjmotstånd, och f_{yd} är sträckgränsen för stålqualiteten

Hammarbandet utsätts för momentet

$$M_{sxd} = \frac{qL^2}{12} \quad (2.9)$$

där q är den horisontella hammarbandslasten och L är c/c -avståndet.

2.6.2 Dimensionering av slänt

Vid dimensionering av slänt antas brott ske kring en centrumpunkt i form av en cirkulär glidyta. Vid släntanalys med hjälp av stabilitetsprogram beräknas en säkerhetsfaktor och denna beror av säkerhetsklass enligt Tabell 2.4 (IEG, 2008a).

Tabell 2.4: Lägsta godtagbara säkerhetsfaktor

Säkerhetsklass	F_{EN}
1	0,9
2	1,0
3	1,1

Den säkerhetsfaktor som erfordras beräknas enligt

$$F_{num} = \frac{\gamma_M F_{EN}}{\eta} \quad (2.10)$$

där

$\gamma_M = \gamma_{cu}$ vid odränerad analys

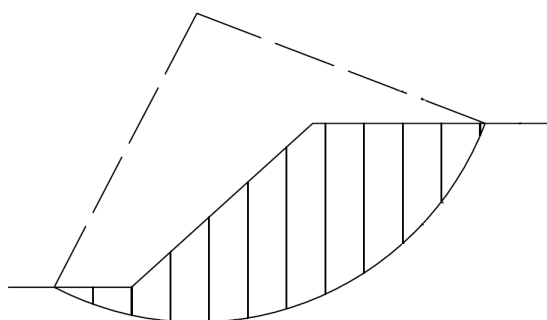
η bestäms enligt avsnitt 2.6

Trafikverket har krav på lägsta godtagbara säkerhetsfaktor F_c vid släntanalys. Dessa krav visas i Tabell 2.5 och gäller för odränerad analys (Trafikverket, 2011).

Tabell 2.5: Lägsta godtagbara säkerhetsfaktor

Säkerhetsklass	F_c
1	1,35
2	1,50
3	1,65

Dimensionering i brottgräns kan exempelvis göras med lamellmetoden, vilken mjukvaran *Geoslope* använder sig av. Antaganden vid användande av lamellmetoden är att jorden beter sig idealplastiskt och att slänten är oändlig i längdriktningen, det vill säga ett tvådimensionellt fall (IEG, 2008a). Den roterande jordvolymen delas in i ett antal lameller, se Figur 2.9.



Figur 2.9: Lamellmetoden

2.7 Miljö

2.7.1 Livscykelanalys

En livscykelanalys, LCA, bedömer den miljöpåverkan som en produkt eller metod medför under hela dess livscykel (Sveriges lantbruksuniversitet, 2019). Ofta görs analysen för att få överblick av en produkts klimatbelastning. Metoden är kvantitativ vilket innebär att resultatet är mätbart i siffror. LCA har många användningsområden, den kan exempelvis användas som beslutsunderlag eller för produktdeklarationer. Analysen ger även ett mer karakteristiskt värde av en produkts miljöpåverkan än vad många andra miljöanalyser ger eftersom hela livslängden för en produkt eller metod analyseras (Sveriges lantbruksuniversitet, 2019).

Livscykelanalysen ska göras från det att råvarorna utvinns från naturen tills att produktens olika delar deponeras eller återvinns. Det är dock näst intill omöjligt att utföra beräkningar för precis allt som används för framställandet av en produkt och avgränsningar måste därför göras. Som avgränsning kan det då exempelvis definieras för vilken tidsperiod eller geografi som analysen avser (Sveriges lantbruksuniversitet, 2019).

Utnyttjandet av LCA tidigt i en beslutsprocess i byggbranschen kan vara fördelaktigt för att kunna påverka och reducera den miljöbelastning som en byggnad eller ett infrastrukturprojekt ger upphov till. Det finns möjlighet att bedöma olika typer av miljöpåverkningar, så som utsläpp av växthusgaser, försurning, övergödning etc. Ofta väljs en specifik kategori innan beräkningarna i analysen görs. Metoden lämpar sig bäst att använda i ett tidigt skede av byggprocessen, eftersom det vanligen är enklare att göra förändringar innan själva byggandet startat (Boverket, 2019).

Enligt Boverket (2019) kan livscykeln delas in i byggskede, användningsskede och slutskede, där varje process beskrivs separat för att kunna tolkas oberoende av varandra. Livscykelanalysen ger sedan en helhetsbedömning av respektive alternativs miljöpåverkan. De tre skeden som en byggnads livscykel delas in i är:

- **A:** Byggskedet (produktskede och byggproduktionsskede)
- **B:** Användningsskedet
- **C:** Slutskedet

I produktskedet ingår råvaruförsörjning, transport och tillverkning av de produkter som ingår i byggnaden eller anläggningen. Byggproduktionsskedet innefattar transporter samt bygg- och installationsprocesser. Användningsskedet innefattar förutom användning också underhåll, reparationer, utbyten, ombyggnader, driftsenergi samt driftsvattenanvändning. I slutskedet ingår demontering och rivning, borttransport, behandling av restprodukter och bortskaffning (Boverket, 2019).

Fördelar och belastningar utanför den uppsatta systemgränsen för den byggnad eller anläggning som analyseras kan också tas hänsyn till, vilket benämns som skede **D** (Boverket, 2019). Detta kan göras för att ge en ännu bättre uppfattning om en byggnads

eller anläggnings totala klimatavtryck. Detta skede kan exempelvis bedöma huruvida systemets produkter kan återanvändas och deras återvinningspotential (Boverket, 2019).

Trafikverkets Klimatkalkyl

Trafikverket har tagit fram en modell för beräkning av den miljöpåverkan som uppkommer från en investering i transportinfrastrukturen under hela dess livscykel. Syftet för detta menar Trafikverket (2018b) är att ”systematiskt beskriva och kvantifiera miljöpåverkan från ett system på ett sådant sätt att det möjliggör överblick och jämförelser”. Modellen innefattar klimatavtryck från både byggskede samt drift- och underhållsskede. Syftet är att kunna ta fram klimatkalkyler för Trafikverkets olika projekt för att kunna utvärdera klimat- och miljöeffektiviseringar på ett systematiskt och effektivt sätt. Trafikverkets styrande dokument TDOK 2015:0007, Klimatkalkyl - infrastrukturhållningens energianvändning och klimatpåverkan i ett livscykelperspektiv, beskriver när Klimatkalkyl ska användas och för vilka projekt. Verktöget har uppdaterats och förbättrats flera gånger för att bli mindre generellt och mer projektspecifikt. På så sätt kan det bli mer användbart för fler aktörer. Indata till modellen kan göras på två sätt. Det ena sättet är att använda sig av så kallade typåtgärder, där färdiga moment är inlagda i verktöget. För varje typåtgärd ingår de olika delar som en konstruktion kan bestå av, exempelvis kan miljöbelastningen beräknas per meter tunnel eller kvadratmeter väg. Alternativet är att mängder för material och arbetsmoment anges separat (Trafikverket, 2018b).

Modellen baseras på metoden som används för livscykelanalys, där utsläpp och indata räknas om till energianvändning och koldioxidekvivalenter (Trafikverket, 2018b). Koldioxidekvivalenter är ett begrepp som används för att kunna göra jämförelser av utsläpp av växthusgaser. Koldioxid har den globala uppvärmningspotentialen 1 och övriga växthusgaser multipliceras med ett värde som ger 1 koldioxidekvivalent (Naturvårdsverket, 2017). Energianvändning och klimatbelastning för en åtgärd beräknas sedan genom att resurser multipliceras med emissionsfaktorer för dessa. Emissionsfaktorerna tar hänsyn till energianvändning och utsläpp som uppkommer av produktion och användning av resurserna. I modellen finns ett antal så kallade resursschabloner. Dessa beskriver ingående byggdelar från en viss typåtgärd samt material- och energiresurser från dessa. Om mer detaljerad information än resursschablonerna i modellen finns att tillgå för ett viss projekt, kan dessa istället användas. Det går även att anpassa emissionsfaktorerna för ett specifikt material, dock måste Trafikverket godkänna metoden som dessa grundar sig i (Eklöf, 2018).

Trafikverkets Klimatkalkyl tar hänsyn till tekniska lösningar, transport av schaktmassor och inverkan från ingående material (Trafikverket, 2018b). Kalkylen ska omfatta hela produktionen av projektet och hela projektets livslängd, dock omfattar den inte en eventuell avveckling. Anledningen till detta är att stora infrastrukturprojekt oftast har en mycket lång förväntad livslängd. Trafiken som antas belasta projektet i driftskedet tas heller inte med i beräkningarna. Verktöget tar hänsyn till klimatpåverkan från transporter av schakt- och fyllnadsmassor. Däremot tar det inte hänsyn till övriga transporter av material till och från arbetsområdet, då dessa generellt bedöms ha

relativt liten miljöpåverkan (Trafikverket, 2018b).

Modellens största felkälla är osäkerheter i indata för enskilda objekt eller åtgärder (Trafikverket, 2018b). I tidiga skeden är denna osäkerhet dock till viss del oundviklig då full information om ett projekt och dess färdiga utformning oftast inte är framtagen i detta skede. När handlingarna är fullständiga för projektet ökar modellens noggrannhet då den kan uppdateras med mer exakta mängder och metoder. En annan felkälla är svårigheten att kontrollera riktigheten på de resursschabloner och emissionsfaktorer som används vid kalkylering av klimatbelastning (emissioner av koldioxidekvivalenter) (Trafikverket, 2018b).

2.7.2 Klimatkrav och klimatbonus

Trafikverket är beställare för många större anläggningsprojekt i Sverige och har som strategi att genom att ställa klimatkrav i sina upphandlingar minimera klimatpåverkan (Trafikverket, 2019d). Dessa klimatkrav gäller för investeringsprojekt på över 50 miljoner kronor. Trafikverket tillämpar också klimatkrav i mindre entreprenader där krav på konstruktionsmaterial och drivmedel ställs. Det långsiktiga målet är att klimatneutralitet ska uppnås i infrastrukturen senast år 2045 (Trafikverket, 2019d). För att uppnå detta mål har bland annat en så kallad klimatbonus införts vid upphandlingar. Denna innebär att en bonus ges om anbudsgivaren kan påvisa hur åtgärder eller materiel ger en reduktion på klimatpåverkan (Trafikverket, 2019d).

Då Trafikverket är en myndighet gäller Lagen om offentlig upphandling (Trafikverket, 2015). Enligt Upphandlingsmyndigheten (2019) måste upphandlande myndigheter och enheter välja det ekonomiskt mest fördelaktiga anbudet. Ekonomiskt mest fördelaktigt kan innebära lägsta kostnad, lägsta pris eller bästa förhållande mellan pris och kvalitet. I upphandlingsdokumentet presenteras den utvärderingsmodell som gäller för upphandlingen. Exempelvis kan kvalitet utgöra en andel av viktningen i tilldelningskriteriet och kostnad utgör resterande. Kvalitet kan då exempelvis vara miljöbelastning.

2.8 Masshantering

Schaktmassor och hantering av dessa är kopplade till Sveriges miljömål, där miljömål nummer 1 enligt Miljösamverkan Västra Götaland, Miljösamverkan Värmland (2010) är *begränsad klimatpåverkan*. Det finns olika regler för hur massorna ska hanteras beroende på om de bedöms som avfall eller inte, något som i sin tur påverkar möjligheter till återvinning eller deponering. Att transportera massor till en deponi är det enklaste alternativet för masshantering, trots att det inte nödvändigtvis är det miljömässigt mest hållbara (Statens geotekniska institut, 2019h). Detta strider mot miljömålet *begränsad klimatpåverkan*, där avfallsåtervinning avseende minskade transporter bland annat innefattas. Mängden transporter kan dock både öka och minska i samband med återvinning av massor (Miljösamverkan Västra Götaland, Miljösamverkan Värmland, 2010). För varje undviken transportkilometer kubikmeter *Jordmassor Fall B* sparas 0,168 kg koldioxidekvivalenter (Trafikverket, 2020a). Detta visar vikten av att minska

både mängd schaktmassor och transporter. Fall B-massor innebär enligt Svensk Byggtjänst (2017) schaktmassor som inte kan återanvändas inom entreprenaden och måste köras bort.

Trafikverket har föreslagit samordning av massor i närliggande anläggningsprojekt för att kunna spara pengar, material och miljö (Frosth m. fl., 2017). Enligt Frosth m. fl. (2017) finns det också indikationer att tid i projekten kan sparas vid samordning av massor till följd av minskad trafik och enklare logistik. Vidare menar Frosth m. fl. (2017) att en annan fördel med samordning av massor är att mindre andel går till deponi vilket är i linje med cirkulär ekonomi. Cirkulär ekonomi kan enligt Fossilfritt Sverige (2018) beskrivas som ”en ekonomi där avfall i princip inte uppstår utan resurser kan behållas i samhällets kretslopp eller på ett hållbart sätt återföras till naturens egna kretslopp”.

Massor som schaktas i anläggningsprojekt betraktas vanligen som avfall. Avfall definieras i miljöbalken som ”/.../ varje ämne eller föremål som innehavaren gör sig av med eller avser eller är skyldig att göra sig av med” (Frosth m. fl., 2017). Enligt miljöprövningsförordningen är återvinning av avfall, i detta fall schaktmassor, tillstånds- eller anmälningspliktigt då de ska användas för byggnads- och anläggningsändamål. Tillståndspliktigt avfall är då det antas förorena omgivningen och om denna risken är ringa är det anmälningspliktigt. Avfallsförordningen gör dock undantag från definitionen av avfall i miljöbalken. Detta undantag avser icke-förorenade massor som schaktats i samband med bygg- eller anläggningsverksamhet, återanvänds på samma plats där schakten utfördes och som inte kan vara skadlig för miljön (Frosth m. fl., 2017). Föroreningsrisken i schaktmassor som avses användas som konstruktionsmaterial är avgörande och för att få använda schaktmassor som fyllnadsmassor i ett anläggningsprojekt krävs det att massorna inte är förorenade. Om massorna kommer från ett centralt stadsområde är sannolikheten stor att de inte är rena och därmed får de inte återanvändas (Göteborgs Stad, UÅ). Definitionen av återanvändning av materialet innebär att det kan användas för samma ändamål utan att behöva behandlas (Statens geotekniska institut, 2019f), i detta fall renas.

Massor kan klassas på olika sätt, exempelvis i form av farligt avfall (FA) eller icke-farligt avfall (IFA). Detta avgör bland annat hur massorna får återanvändas eller var de kan deponeras. Om marken är förorenad krävs ibland efterbehandling i form av till exempel sanering. Naturvårdsverket (2009) har tagit fram riktvärden vilket är ett verktyg för bedömning av föroreningsituationen i ett område. Riktvärdena tar hänsyn till de hälsorisker och miljörisker som är kopplade till en viss förorening och innefattar både direkt och indirekt kontakt med föroreningen. Förväntad markanvändning är en central del i bestämmandet av riktvärden eftersom detta avgör hur människor utsätts för den eventuella föroreningen (Naturvårdsverket, 2009). De två typer av generella riktvärden som finns definieras enligt Naturvårdsverket (2009) som

- ”Mindre känslig markanvändning, MKM, där markkvaliteten begränsar val av markanvändning till t.ex. kontor, industrier eller vägar. De exponerade grupperna antas vara personer som vistas i området under sin yrkesverksamma tid samt barn och äldre som vistas i området tillfälligt. Markkvaliteten ger förutsättningar för markfunktioner som är av betydelse vid mindre känslig markanvändning, till exempel kan vegetation etableras och djur tillfälligt vistas i området. Grundvat-

ten på ett avstånd av cirka 200 meter samt ytvatten skyddas.”

- ”Känslig markanvändning, KM, där markkvaliteten inte begränsar val av markanvändning. Alla grupper av människor (barn, vuxna, äldre) kan vistas permanent inom området under en livstid. De flesta markekosystem samt grundvatten och ytvatten skyddas.”

I stora anläggningsprojekt innefattande väg- och/eller järnväg ingår en väg- eller järnvägsplan i beslutsunderlaget (Statens geotekniska institut, 2019e). De ofta mycket stora volymerna schaktmassor som förväntas uppkomma i sådana projekt ska redovisas i en masshanteringsplan i miljökonsekvensbeskrivningen för projektet. Masshanteringsplanen blir därmed en del av beslutsunderlaget för väg- eller järnvägsplanen och ska bland annat innehålla information huruvida schaktmassor kan återanvändas inom eller utanför projektet samt var massorna kan deponeras (Statens geotekniska institut, 2019e). Den fastställda väg- eller järnvägsplanen jämföras med ett tillstånd enligt miljöbalken (Statens geotekniska institut, 2019e).

3 Stabilisering av schaktslänt

Slänter, både naturliga och framschaktade, behöver ofta förstärkas när de blir höga eller branta i förhållande till jordens hållfasthet för att förhindra skred eller ras (Statens geotekniska institut, 2019a). Är marken mycket lös samt om risk för ras eller skred föreligger, eller vid strikta krav gällande sättningar, kan jorden förstärkas eller stabiliseras med hjälp av en stödkonstruktion (Statens geotekniska institut, 2019a).

3.1 Stödkonstruktioner

Vid användande av olika typer av stödkonstruktioner är det viktigt att dessa utförs korrekt så att risk för sättningar samt otillräcklig stabilitet undviks (Statens geotekniska institut, 2019a). Vilken metod som lämpar sig bäst i ett projekt beror på flertalet faktorer och beslut fattas utifrån resultatet från den geotekniska undersökningen. De mest avgörande faktorerna vid val av stödkonstruktion är jordlagrens sammansättning och dess egenskaper, utformning av byggnadsverket, schaktdjupet samt dimensionerande laster (Statens geotekniska institut, 2019a). Övriga faktorer att ta hänsyn till vid val och utformning av stödkonstruktion är bland annat konsekvensen av eventuell ras eller skred, möjlighet till övervakning av dess funktion samt om konstruktionen är avsedd att vara temporär eller permanent (Lundström m. fl., 2015).

Stödkonstruktioner används ofta vid djupare grundläggningsarbeten eller i fall där underliggande jordlagren har otillräcklig stabilitet. Det finns ett antal olika typer av stödkonstruktioner och de används vanligen temporärt under byggskedet men kan också användas permanent (Statens geotekniska institut, 2019g).

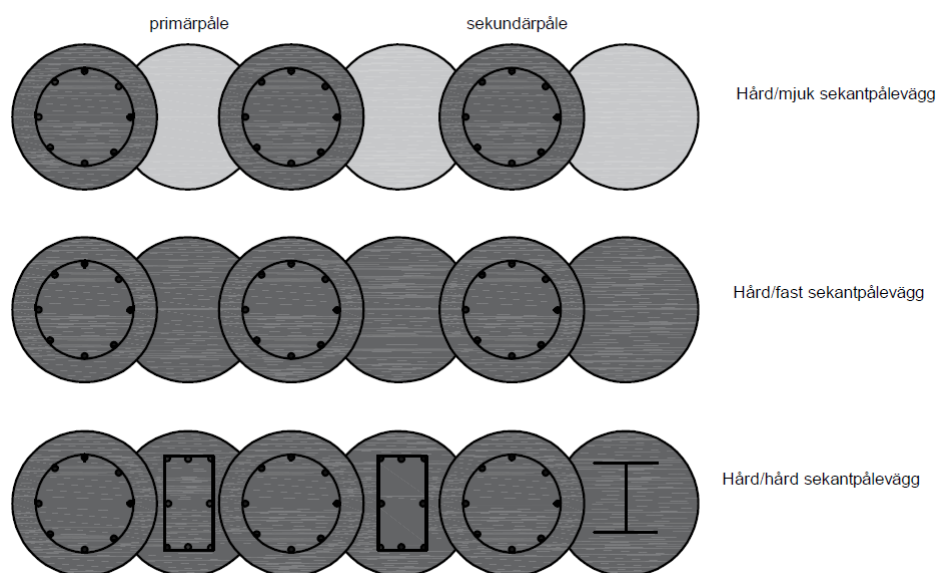
3.1.1 Sekantpålning

Sekantpålning är en typ av stödkonstruktion som kännetecknas av överlappning av pålar. Detta ger en tät konstruktion som förhindrar vatten och jordmassor från att tränga in i schakten. I Sverige är metoden inte vanligt förekommande, men i Västeuropa, Nordamerika och Asien har metoden tillämpats med framgång (Åhnberg, 2019). Metoden är användbar på arbetsplatser med begränsat utrymme, exempelvis i innerstadsområden, eftersom pålarna kan placeras relativt nära befintliga konstruktioner. En annan fördel med sekantpålning är att pålarna kan placeras med stor flexibilitet vilket gör att schakten kan anpassas till önskad geometri, jämfört med konventionell stålspons som måste installeras i en rät linje (Åhnberg, 2019).

Sekantpålning kan utföras på varierande sätt beroende på om konstruktionen är avsedd att vara temporär eller permanent. Pålarna består av primär- och sekundärpålar, där primärpålarna installeras först med ett visst avstånd mellan varandra. Därefter installeras sekundärpålarna mellan primärpålarna så att en överlappning uppstår.

Primärpålarna har lägre hållfasthet än sekundärpålarna och olika kombinationer mellan dessa finns för utförandet. De olika kombinationerna är hård/mjuk, hård/fast eller hård/hård sekantpålsvägg vilka betecknar hållfastheten hos pålarna, se Figur 3.1 (Åhnberg, 2019).

De mjuka pålarna består vanligen av cement, bentonit och ibland tillsatsmedel i form av slagg eller flygaska. De fasta pålarna består vanligen av betong med lägre hållfasthet medan hårda pålar består av armerad betong. Vid användning av mjukare primärpålarna blir det enklare att utföra borrning av sekundärpålen vilket ger fördelen att endast sekundärpålen behöver armeras. Detta ger en billigare konstruktion men som kan uppnå liknande egenskaper som hård/fast. Hård/mjuk sekantpålsvägg kan ge sämre bärförmåga, osäker täthet och sämre beständighet vilket är anledningen till att den lämpar sig bättre som temporär stödkonstruktion än som permanent (Åhnberg, 2019).



Figur 3.1: Olika typer av sekantpålsväggar, egen figur inspirerad av Åhnberg (2019)

Sekantpålsväggen kan även installeras med en viss lutning inåt schakten (Åhnberg, 2019). Detta kan vara användbart om det är begränsat utrymme vid schakten. Kostnadseffektiviteten hos metoden är starkt beroende av projektets storlek eftersom etableringskostnaden är relativt hög (Åhnberg, 2019). För mindre projekt ger detta stor påverkan på totalkostnaden och metoden är då inte att betrakta som lika lämplig. Schaktdjupet som krävs har stor inverkan på val av stödkonstruktion och vid djupare schakter kan sekantpålning vara mer kostnadseffektiv. Risken för inläckage av vatten hos sekantpålning ökar dock med ökande schaktdjup (Åhnberg, 2019).

I Sverige har sekantpålning bland annat använts vid ombyggnad av Korsvägen i Göteborg, där sekantpålarna var mellan 15 och 25 meter långa (Trafikverket, 2019b). På grund av att metoden ger upphov till förhållandevis små vibrationer vid utförandet blev sättningarna på omgivande byggnader små. Dock ledde det till en större belastning på miljön jämfört med exempelvis konventionell stålspons eftersom betong använts. Sekantpålning är också dyrare än stålspons men är användbar vid stora schakter (Tra-

fikverket, 2019b).

3.1.2 Slitsmur

Slitsmur är en typ av stödkonstruktion med många likheter med sekantpålning (Åhnberg, 2019). En slitsmur innebär att en schaktgrop, så kallad slits, grävs ur och stabiliseras med hjälp av en vätska, vanligen bestående av bentonit eller en polymer. Därefter placeras en armeringskorg i schakten, och schakten fylls med betong (Trafikverket, 2019c). Slitsmur ger en tät konstruktion med bärighet i samma storleksordning som sekantpålning. Den bredd som krävs på slitsmuren beror på schaktens djup, men kan begränsas om utrymmet är trångt, exempelvis i innerstadsområden (Åhnberg, 2019). Metoden har liten omgivningspåverkan då den medför låga vibrationer och buller jämfört med exempelvis traditionell slagning av stålspons. De platsgjutna betongväggarnas uppgift är att stötta upp schaktväggarna för att förhindra ras (Alén m. fl., 2006). Betongväggarna är sammansatta av ett antal rektangulära element i form av paneler med vertikala fogar mellan. Utformningen av elementen påverkas av markförhållanden, schaktdjup samt böjstyvhet hos elementen. Den horisontella längden hos panelerna är vanligen mellan 3 och 6 meter med en tjocklek på omkring 0,6 till 1,4 meter. Schakten bör gå ner till ett djup där berg eller fastare jordlager nås. Vid markförhållanden med sämre bärighet, exempelvis om marken består av lös lera, kan åtgärder behöva vidtas. Då kan tvärgående slitsmurar krävas under den blivande schaktbotten. Detta minskar vibrationer samt minskar risk för bottenuppträckning. Denna metod användes bland annat vid byggandet av Götatunneln i Göteborg (Alén m. fl., 2006).

Likt sekantpålning kan slitsmurarna också installeras med överlapp mellan elementen. Slitsmuren kan utföras i plana element, eller i mer komplicerade, exempelvis T-tvärsnitt (Åhnberg, 2019). Översta delen av slitsmuren kan ersättas av en platsgjuten betongbalk i fall där ökad bärighet i konstruktionen krävs, eftersom stödvätskan minskar bärigheten. En platsgjuten betongbalk verkar även lastfördelande i längsgående riktning hos slitsmuren (Alén m. fl., 2006).

En kritisk parameter för slitsmuren är förmågan att hålla tätt mot vatten (Alén m. fl., 2006). Eftersom konstruktionen består av betong är sprickbildning något som måste beaktas vid dimensionering och utförande. Metoden kan också bli mycket kostsam beroende på vilken armeringsmängd som krävs (Alén m. fl., 2006).

Jordartens egenskaper har avgörande betydelse vid dimensionering av slitsmuren, avseende bland annat risk för bottenuppträckning samt jordens skjuvhållfasthet (Alén m. fl., 2006). Homogena jordar är fördelaktiga då de har samma egenskaper i hela jorden, där finns goda möjligheter att få en jämn och tät vägg. I vissa fall kan bentonitvätskan bytas mot vatten, vilket innebär att vätskans negativa inverkan på betongen försvinner. Bentonitvätskan används för att täta mot vatten, vilket inte behövs vid arbete i lera på grund av lerans låga permeabilitet.

Beroende på stödvätskans sammansättning kan denna ha påverkan på miljön om spill eller utläckage skulle inträffa. Vid utförande av slitsmurar i lera kan dock vatten användas som stödvätska och då minskar miljöpåverkan (Alén m. fl., 2006). Ett annat sätt att minska stödskonstruktionens miljöpåverkan är att en andel av cementen

byts ut mot filler. På så sätt minskar koldioxidutsläppen från betongen. Denna metod har använts utomlands, och har fungerat väl då varken hållfasthet eller övrig kvalitet påverkats. I Sverige har metoden testats och godkänts för användning av Trafikverket och användes därför i en deletapp i Västlänken, Göteborg. Konstruktionen får lång livslängd tack vare av betongens beständighet och är därför lämplig som permanent stödkonstruktion (Trafikverket, 2019c). Generellt är slitsmur en dyrare metod än sekantpålning, men den möjliggör att grundlägga på ett större djup (Åhnberg, 2019). Slitsmurar som stödkonstruktion är enligt Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (UÅ) mest ekonomiskt lönsam när den används som permanent konstruktion. Ett exempel på när slitsmur används som permanent konstruktion är i fyrspårsutbyggnaden mellan Lund och Arlöv (ByggTeknik, 2020). En del av sträckan består av en tunnel och väggarna till denna tunnel göts ner direkt i marken i form av en slitsmur och jorden schaktades sedan bort. Slitsmuren hade två syften, dels att verka som stödkonstruktion under schaktningen och blev sedan den färdiga tunnelns väggar. Detta sparade tid i projektet då formväggar inte krävdes för betonggjutningen, samt att ytan ovanpå tunneln kunde nyttjas tidigare för bland annat passager (ByggTeknik, 2020).

3.1.3 Stålspont

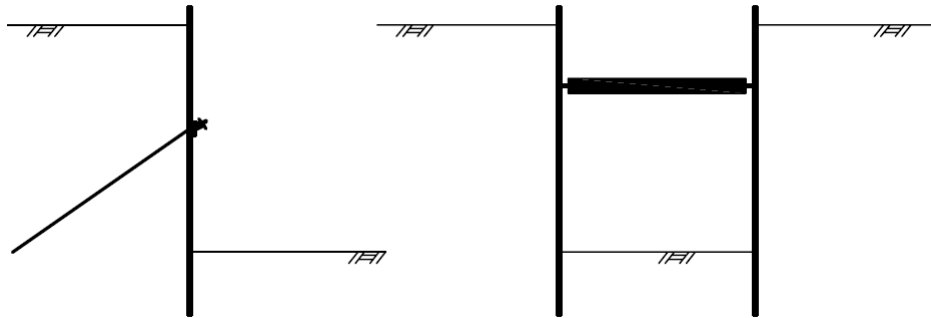
Den mest använda stödkonstruktionen i Sverige idag är stålspont, vilken består av profilerade stålplankor som låser i varandra och bildar en barriär mot massor och vatten (Hercules Grundläggning, UÅ[b]). Det finns mycket kunskap och erfarenhet om metoden och det är ofta ekonomiskt lönsamt att använda denna. Stålspont används främst som temporär stödkonstruktion. Stål som material är fördelaktigt då det väger lite, kan återanvändas samt att det tål hög spänning vilket kan uppstå i hårdare och mer grovkornigt material (Alén m. fl., 2006). Stålspont kan också användas till stort djup genom att flera element svetsas eller bultas samman i vertikalled (Bowles, 1988).

Stålspont har många användningsområden och är framförallt användbar vid släntstabilisering. De två vanligaste typerna av stålspont är konsolspont och förankrad spont. Vilken metod som används beror på jordtyp och dimensionerande laster (National Engineering Handbook, 2007).

Vid användande av konsolspont slås den så djupt ner i marken så att det aktiva och det passiva jordtrycket balanserar varandra. Vid dimensionering av förankrade sponter kontrolleras momentjämvikt kring nivån för förankring och utifrån detta bestäms erforderligt nedslagningsdjup (Fredriksson m. fl., 2018). Förankrad spont kan förankras på olika sätt i schaktgropen och används ofta vid schakter djupare än cirka 5 meter och då förankring kan ske i hårdare material eller berg från schaktgropen (National Engineering Handbook, 2007).

Kraftigare och/eller djupare sponter behöver ibland stöttas upp med hjälp av stag eller stämp. Emellertid leder detta till ökade kostnader och ökad produktionstid (Edstam, 2018). Stag används för att förankra sponten i jord eller berg, se Figur 3.2. Stagen består ofta av ställinor eller stålstänger vilka borrar ned för förankring (Hercules Grundläggning, UÅ[a]). Stämpad spont innebär att förankringen av sponten sker invändigt i schakten, jämfört med stag vilka förankras utvändigt, se Figur 3.2. Stämpan består oftast av balk- eller rörelement monterade med hammarband (Hot

och Swedmark, 2014).



Figur 3.2: Principskiss över stagad spont (till vänster) och stämpad spont (till höger)

Stålspont kan anpassas till djup och utformning av schakten. Sponten kan återanvändas och det kan enligt Deep excavation (UÅ) vara problematiskt att använda den som en permanent stödkonstruktion. Sättningar kan uppstå vid installation av sponten och störningar som exempelvis buller kan uppkomma vid nedslagning eller vibrering av sponten (Deep excavation, UÅ). Konstruktionen är relativt tät, men vid striktare krav på inget inläckage mot vatten kan tätningsmedel behöva användas för att hålla samman plankorna i sponten (Hercules Grundläggning, UÅ[b]).

Vid schaktning i lös lera används ibland etappvis schakt. Spontväggen är böjvek i horisontalled, varför hammarband används för att omfördela jordtrycket horisontellt (Edstam, 2018). Därmed ökar det stabiliserande bidraget från den del av spontväggen som ligger strax intill den djupare schaktdelen. Detta gör även att de rörelser som uppstår vid själva schaktningen reduceras. Dock menar Edstam (2018) att det finns många osäkerheter och antaganden som grundar sig i egna erfarenheter vid framtagande och dimensionering av spontvägg och hammarband. Finita Element-modeller kan tas fram men dessa modeller är ofta kostsamma.

Sponter kan användas för att förhindra risk för ras eller skred, minska risk för sättningar samt för att förhindra bottenuppträckning (Lundström m. fl., 2015). Är jorden blockig kan detta försvåra utförandet av tätspont och en glesspont kan istället användas. Glesspont utförs genom att stålrör slås ner i marken och därefter stöttas utrymmet mellan rören med exempelvis bräddor eller sprutbetong. Denna konstruktion går inte att bygga ner under schaktbotten vilket gör att den inte är lämplig för tätning mot grundvatten. I lösare jord som exempelvis lera är det möjligt att använda sponter i andra material, exempelvis plast eller trä. Stabiliteten är ofta beroende av jordens hållfasthet under schaktbotten. Hållfastheten kan dock försämrats av störning som uppkommer vid vibrering eller slagning av sponten (Lundström m. fl., 2015). Det är främst vid installation av spontväggen som problem avseende hållfasthet kan uppstå till följd av att jordmaterialet förflyttas vid vibreringen eller nedslagningen av sponten och antingen kompakteras eller blir lösare. Vid installation av spont i mark ökar horisontalspänningen, storleken på denna är beroende av tvärsnittets geometri och styvhet vilket påverkar deformation och utböjning hos sponten. Stålspont är särskilt utsatt jämfört med andra material på grund av dess asymmetriska geometri samt låga böj- och vridstyvhet (Grabe och Osthoff, 2018).

3.2 Jordförstärkning

Jordförstärkning är ett begrepp för metoder som förbättrar jordens egenskaper och ökar deras lastbärande förmåga. Det kan göras på olika sätt med olika metoder, exempelvis packning, dränering, armering och masstabilisering (Statens geotekniska institut, 2019a). I detta avsnitt beskrivs ett antal metoder som är lämpliga för jordförstärkning av lera.

3.2.1 Dränering

Genom att dränera finkorniga jordar som lera blir jorden fastare och klarar högre laster. Om marken belastas med fyllning påskyndas dräneringsprocessen (Statens geotekniska institut, 2019a). Vertikaldränering kan användas som metod för att påskynda sättningsförloppet i en jord och denna metod fungerar utmärkt i lös lera (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003). Metoden används framförallt i finkorniga jordar där konsolideringssättningar ofta uppkommer under lång tid. Vertikaldräner installeras med ett visst avstånd och dräneringen kombineras ofta med belastning för att påskynda sättningsförloppet. Vertikaldräner är ofta prefabricerade och installation sker till önskat djup från en maskin. Fördelar med vertikaldränering är att det är en kostnadseffektiv och väl beprövad metod. Det är också en bra metod för att öka en jords hållfasthetsegenskaper. En nackdel med metoden är att det inte går att täta mot vatten.

I begreppet dränering ingår också frysning vilket är en metod där en jordmassa fryses för att öka dess hållfasthet. Användning av denna metod medför relativt hög etableringskostnad men låg driftskostnad. Metoden används ofta temporärt för att stabilisera exempelvis en schaktvägg, samtidigt som det skapar täthet mot vatten. Vanligen är det flytande kväve som leds ner i frysror i jordmassan och förångas vilket gör att jordpartiklarna binds av det frysta porvattnet. Frysning kan användas i alla typer av jordar (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003).

3.2.2 Jetinjektering

Jetinjektering är en metod för jordförstärkning och tätning. Metoden används vanligen vid grundförstärkning, schakt- och släntstabilisering samt vid bergstabilisering. En högtryckspump pumpar vatten och luft med ett högt tryck ner i undergrunden vilket gör att materialet eroderar. Injekteringsvätska, vanligen bestående av cement blandat med vatten, pumpas ned och blandas med det eroderade materialet (Svensson, 1990). Vid utförandet roterar injekteringsutrustningen ner i marken och lyfts sedan uppåt när injekteringsvätskan tillsätts. Detta skapar en jetpelare i marken, diameter cirka 0,4-2 meter. Överskottsslam bildas vilket pressas upp genom borrhålet vid uppåtrotationen. Vid behov av pelare med högre momentkapacitet kan jetpelarna kombineras med till exempel stålrör. Resultatet av jetinjektering är zoner med förhållandevis hög tryckhållfasthet. En nackdel är att ljudvolymen vid installation av pelarna kan vara hög och störa omgivningen. En fördel är att metoden vid installation inte ger upphov till några vibrationer (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003).

3.2.3 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare, K/C-pelare, används oftast för att minska sättningar och öka stabiliteten vid väg- och järnvägsprojekt, men också vid djupa schakter och ledningsgravar (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003). K/C-pelare används främst i lera men kan också användas i andra typer av jordar. De tillverkas genom att ett rotationsverktyg körs ner i jorden till ett visst djup, vänds vid bottenläget och vid uppåtrotationen sprutas bindemedel ut och roteras kraftigt in i jorden. Vilken typ av bindemedel som används kan variera beroende på jordart och önskad stabiliserande förmåga (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003).

De vanligaste bindemedlen i K/C-pelare är cement och kalk och proportionerna mellan de två bindemedlen brukar i 3 av 4 fall vara 50-50 enligt Axelsson m. fl. (2000). Kalkcementpelarna utformas ofta singulärt eller överlappande varandra och deras diameter är normalt 0,6 eller 0,8 meter. Fördelar med metoden är att den är kostnadseffektiv, anpassningsbar till olika markförhållanden och genererar låga nivåer av buller och vibrationer (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003).

3.2.4 Masstabilisering

Konventionell massutskiftning, det vill säga urgrävning av befintliga jordlager och ersättning av dessa med massor med högre bärförmåga, är det traditionella sättet vid grundläggning där risk för sättningar eller otillräcklig stabilitet föreligger. Massutskiftning är en dyr metod och bidrar till ökade transporter och därmed utsläpp av växthusgaser samt partiklar. Genom att istället stabilisera jordmassor så att de kan utnyttjas på plats kan många fördelar dras (Axelsson m. fl., 2000).

Jordstabilisering innebär att olika typer av substanser eller stabiliseringsmedel tillsätts för att på så sätt stabilisera och förbättra jordens mekaniska egenskaper (Talme A., 1968). Skillnaden mot exempelvis stabilisering med pelare är att hela jordlagret förstärks och resultatet blir ett stabiliserat block (Axelsson m. fl., 2000).

Till följd av finkorniga materials stora mantelarea jämfört med dess partikeldiameter är dessa ofta enklare att stabilisera. Partiklarna i lerjord är långsträckta och jordens yta är stor och platt (Makusa, 2012).

Stabiliseringsmedel kan vara hydrauliska eller icke-hydrauliska. Beroende på vilken typ det är reagerar bindemedlet med vatten eller mineraler och bildar ett cementbaserat kompositmaterial (Makusa, 2012). Cement och kalk är så kallade primära stabiliseringsmedel vilket innebär att de ensamma ger jordmaterialet ökad hållfasthet. Sekundära tillsatsmedel däremot behöver någon aktivator för att fungera stabiliserande. Friktionsjord, exempelvis fin sand, kan också tillsättas i den mjuka jorden som ett så kallat tillsatsfyller för att öka jordens hållfasthet (Axelsson m. fl., 2000).

Cement

Vid stabilisering med hjälp av cement är dess reaktion med vatten det essentiella. Reaktionen är oberoende av vilken typ av material som ska stabiliseras och därför är cement vanligen använt i olika typer av jordar. Vid krav på hållfasthet kan olika typer av cement väljas, detta val görs ofta också beroende på vilken typ av jord som ska stabiliseras (Makusa, 2012). Cementreaktionen är snabb vilket är anledningen till att jord stabiliserad med cement ofta har högre hållfasthet jämfört med jord stabiliserad med kalk (Axelsson m. fl., 2000). Cementproduktion ger upphov till koldioxidutsläpp, detta uppkommer framförallt från upphettning av kalkstenen. Enligt Svensk Betong (UÅ) utgör cementtillverkningen i världen cirka 3-4 % av de totala utsläppen.

Kalk

Stabilisering av jord med kalk är ett ekonomiskt alternativ jämfört med cement (Makusa, 2012). En puzzolanisk reaktion, dvs. en reaktion med kalciumhydroxid och vatten, sker där kalk skapar cementliknande material. Vid stabilisering med kalk i lera övergår de naturligt platta lerpartiklarna till sammankopplade strukturer. Lerjorden blir vid stabilisering med kalk torrare och mindre känslig för fuktförändringar (Makusa, 2012). Stabiliseringen kan ske med endera osläckt eller släckt kalk. Fördelar med att använda osläckt kalk jämfört med släckt kalk är bland annat att den är tätare och därmed kräver mindre utrymme, mindre damm genereras samt att hållfastheten ökar snabbare samtidigt som fukttinnehållet minskar snabbare till följd av att processen genererar värme. Kalkstabilisering av jord används exempelvis vid stabilisering av våt mark, släntstabilisering och grundförstärkning. Vid förekomst av svavel eller organiskt material i jorden finns det risk för att dessa ämnen kan hämma reaktionsprocessen i kalk (Makusa, 2012).

Det har visat sig att stabilisering av djupa pelare kan göras effektivt med hjälp av en kombination av bindemedlen cement och osläckt kalk (Axelsson m. fl., 2000). Fördelarna från båda bindemedlen utnyttjas då snabb och hög hållfasthet fås från cementstabiliseringen och värmegenereringen från släckningen av kalken påskyndar cementens reaktion (Axelsson m. fl., 2000).

Flygaska

Flygaska är en biprodukt av koleldade kraftverk (Makusa, 2012). Emellertid varierar flygaskans egenskaper beroende på tillverkningsprocessen i kraftverket (Axelsson m. fl., 2000). Stabilisering med flygaska har vissa begränsningar; jorden som ska stabiliseras bör ha lågt fukttinnehåll. Vidare kan svavlet som finns i flygaska ge upphov till bildning av vissa mineraler i jorden vilket kan minska hållfastheten (Makusa, 2012). Stabilisering med hjälp av flygaska görs genom tillsats av kalciumhydroxid och vatten vilket ger jordmaterialets hållfasthet en långsam styrkeökning. Ofta tillsätts portlandcement, där kalciumhydroxid ingår, för att snabbare hållfasthetsökning ska uppnås (Axelsson m. fl., 2000).

Masugnsslagg

Masugnsslagg är en biprodukt från metallframställning. Vid stabilisering av jord är det framförallt granulerad masugnsslagg som används, vilket är en biprodukt från järnframställning. Portlandcement är den vanligaste aktivatorn som används för att det granulerade masugnsslagget ska fungera som stabiliserande medel i en jord eftersom portlandcement innehåller kalciumhydroxid. Hållfasthetens ökning är starkt beroende av temperaturen, där ökad temperatur ger snabbare hållfasthetstillväxt och minskad temperatur ger långsammare hållfasthetstillväxt (Axelsson m. fl., 2000).

Lignin

Lignin förekommer i högre växter, exempelvis träd, och är en benämning på en serie av polymera föreningar. Cirka 25–30 % av vikten i ved utgörs av lignin. Lignin binder cellulosa fibrerna och bidrar därmed till vedens styva struktur (Nationalencyklopedin, 2020). Vid tillverkning av pappersmassa och kartonger är sulfit-lignin en restprodukt. Denna restprodukt används idag på olika sätt, exempelvis som biolja i nya produkter.

Att använda lignin vid jordstabilisering har studerats under de senaste decennierna (Ceylan m. fl., 2010), och bindemedel gjorda av lignin användes i Sverige redan under början på 1900-talet (Davidson m. fl., 1957). Lignin som bindemedel i framtidens produkter är positivt ur miljösynpunkt eftersom det är en förnyelsebar produkt. Det finns pågående forskning angående hur lignin kan användas som bindemedel i asfalt i framtiden (Lindberg, 2018).

Forskningsprojekt har gjorts där undersökning av hur lignin kan användas som stabiliseringsmedel i lerjordar. Eftersom lignin är ett naturligt bindemedel som håller samman cellulosa fibrerna i växter, är det på så sätt anpassat för att kunna hålla samman små lerpartiklar (Mellgren, 2007). Vid tillsättning av lignin till en lerjord uppstår dispersion, vilket ökar lerans stabilitet. Detta eftersom eventuella håligheter i lerjorden fylls och därmed ökar densiteten, förbättrar vattentätheten samt minskar frostkänsligheten (Ceylan m. fl., 2010).

Ceylan m. fl. (2010) har utfört ett laboratorieförsök i Iowa med syftet att undersöka hur lignin kan användas vid stabilisering av vägar. Ligninet som användes i studien var det lignin som bildas vid produktion av biobränsle. Detta lignin är svavelfritt till skillnad mot det lignin som produceras vid produktion av pappersmassa. Resultatet blev att jorden kunde stabiliseras med samma resultat som om konventionellt tillsatsmedel, till exempel flygaska, hade använts. Jorden som användes i stabiliseringsförsöket bestod av 52 % silt och lera, 40 % sand och 8 % grus. Rapportens slutsats var att användning av lignin är ett av många svar på hur det kan verka för en fortsatt hållbar utveckling (Ceylan m. fl., 2010).

4 Referensprojekt E45 Lilla bommen - Marieholm



Figur 4.1: Slänt i lera på referensprojektet, copyright Anton Gunnebrink (2020)

På uppdrag av Trafikverket utför Peab en sänkning av väg E45 i centrala Göteborg. Projektet är en totalentreprenad med samverkan och kontraktssumman uppgår till drygt en miljard kronor. Den totala sträckan är cirka en kilometer lång och vägen ska sänkas ner sex meter. Projektet innefattar även en 400 meter lång vägtunnel i betong som ska överdäckas för framtida bebyggelse (Peab, UÅ). Resterande del av vägen utförs med stödmurar som är 6 till 7 meter höga och även dessa planeras för en eventuell framtida överdäckning (Peab Anläggning Halland, 2019). Syftet med projektet är att generera högre trafiksäkerhet samt bidra till en central stadsutveckling. Den förberedande entreprenaden startade i maj år 2015 och hela projektet beräknas vara klart år 2021 (Trafikverket, 2019a).

Den totala mängden schaktmassor i projektet uppgick till cirka $500\,000\text{ m}^3$. Cirka $300\,000\text{ m}^3$ av dessa bestod av lös lera, så kallad Göteborgslera. Schaktarbeten i denna har varit ett av projektets största utmaningar och har ställt höga krav på geotekniska analyser (Peab, UÅ). Vid schaktning har det inte använts några stödkonstruktioner för att förhindra skred, säkerhet mot detta har istället säkerställts genom släntning, se Figur 4.1. Omkring 4500 kohesionspålar av betong har använts där varje påle hade en längd på cirka 65 meter. I lös lera medför pålning rörelser i mark vilket kan skada omkringliggande bebyggelse, därför har det varit viktigt att ständiga kontroller utförts under projektets framdrift. Ett krav i projektet var också att stabilitetsanalyser för schakter djupare än 1,5 meter ska göras på grund av den lösa lerans bristande stabilitet (Peab Anläggning Halland, 2019).

Då projektet är beläget i stadsmiljö antas det att någon form av förorening i jorden förekommer. Deponeringsmöjligheter i nära anslutning till projektet har varit begränsade vilket skapat svårigheter med tanke på de stora schaktvolymerna som behövt transporteras bort (Peab Anläggning Halland, 2019). För lermassor med riktvärden under känslig markanvändning (KM) låg den närmsta deponin cirka 8 km från arbetsplatsen. Denna deponi blev full under projektets gång och kunde inte ta emot den mängd massor som var tänkt. Därför fick andra deponier användas, där det längsta avståndet var 8,7 mil från projektet. För lermassor med riktvärden mindre än mindre känslig markanvändning (MKM) men $> KM$ var avståndet till deponi cirka 6 mil enkel resväg till samtliga (Peab Anläggning Halland, 2019).

En annan svårighet i projektet har varit att många aktörer arbetar på liten yta. Logistikplanering och tillgång till ytor har därför varit avgörande för framdriften (Peab Anläggning Halland, 2019). Enligt Engström¹ var som mest 40 schaktbilar igång samtidigt på projektet vilket är problematiskt i stadsmiljö och på ett projekt som redan har begränsade ytor och hög belastning på trafiken. På projektet har nästan uteslutande större ekipage med kapacitet ca 32 ton används för transport av schaktmassor. Kapacitet för grävmaskin kan skilja sig beroende på om schakt utförs intill spont eller i schaktgropen. I normalfallet är kapaciteten ca $55 \text{ m}^3/\text{h}$ men denna kan minska till nästan hälften vid schakt intill spont enligt Engström¹.

4.1 Referenssektion

Projektet har flera sektioner med varierande geometri. Referenssektionen som väljs har ett schaktdjup på fyra meter och en schaktbredd på fem meter. Den totala schaktlängden sätts till 1500 m. Grundvattenytans läge är en meter under markytan och berget befinner sig på cirka 100 meter under markytan. Denna referenssektion väljs i samråd med Engström¹ och Gunnebrink².

Det antas att varje jordlager är homogent i sin utbredning. Jordlager och dess parametrar är typiska för referensprojektet och har bestämts i samråd med Gunnebrink².

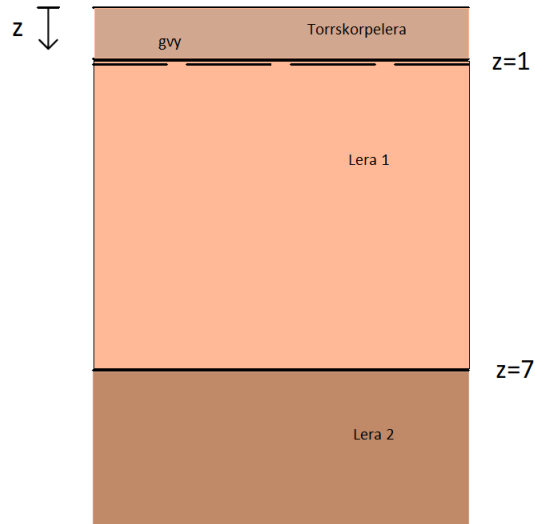
Det översta jordlagret består av torrskorpelera och i gränsen till det underliggande jordlagret, lera, är grundvattenytan belägen, se Tabell 4.1 och Figur 4.2.

Tabell 4.1: Jordartstabell

z [m]	Jordart	Tunghet γ [kN/m ³]	Kohesion c_u [kPa]	Kohesion, ökning [kPa/m]
0-1	Torrskorpelera	17,5	25	-
1-7	Lera 1	16,5	14	1,38
7-25	Lera 2	16	22	1,38

¹Anders Engström, platschef Peab Anläggning region väst, mailkontakt den 27 mars 2020.

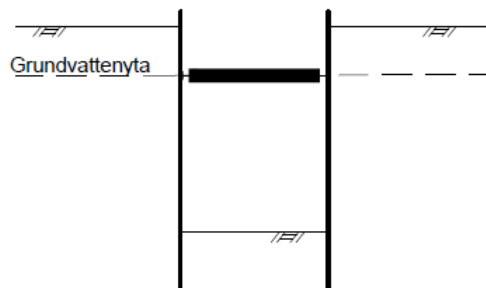
²Anton Gunnebrink, geokonstruktör/geotekniker Peab Anläggning, personlig kontakt den 25 februari 2020.



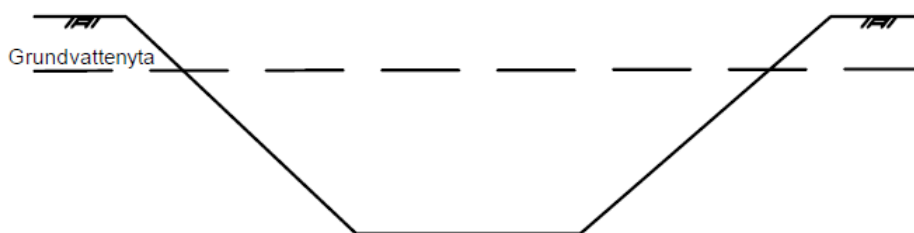
Figur 4.2: Jordlagerföljd i referenssektionen

För referensprojektet antas massorna ha riktvärden $>KM < MKM$ eftersom projektet är beläget i stadsmiljö.

Stämpad stålspons väljs som alternativ att jämföra mot slänt, se Figur 4.3 och 4.4. Detta eftersom denna metod lämpar sig vid schaktarbete i lera samt eftersom det är en väletablerad metod i Sverige. Användning av stämp istället för stag väljs på grund av att berggrunden ligger på ett sådant djup så att stag inte antas vara lämpligt. Som temporär stödkonstruktion för referenssektionens schaktdjup är det troligtvis inte ekonomiskt lönsamt att använda sig av någon av de andra stödkonstruktionerna, slitsmur eller sekantpålning.



Figur 4.3: Principskiss över den första metoden som ska analyseras, stämpad stålspons



Figur 4.4: Principskiss över den andra metoden som ska analyseras, släntning

Produktionsförutsättningar

En spont som används i Göteborgsområdet antas kunna återanvändas 10-15 gånger utan modifieringar enligt Larsson³. I detta fall antas det att sponten slås med 180 meter per etapp. Stålet är valsat och tillverkat av skrot. Tillverkaren Arcelor har använts i andra projekt med spont i området där Peab är entreprenör och det antas därför att denna leverantör kan användas i referensprojektet. Den huvudsakliga produktionen för leverans i Sverige är belägen i Karlstad (Arcelor Mittal, UÅ), således antas det att leveranser av sponten sker härifrån. Avståndet mellan Göteborg och Karlstad är cirka 25 mil. Enligt Larsson³ kan sponten slås om tre gånger på plats i projektet. Därefter måste den köras bort från arbetsplatsen för att rengöras och eventuellt renkapas. Sponten antas slås om i åtta etapper, vilket kommer innebära tre olika leveranstillfällen av sponten. Varje kranbilstrailer som levererar sponten kan lasta 28 ton enligt Larsson³. Sponttypen PU12 har massan 110 kg/m^2 , vilket ger att en bil kan lasta mellan 200-250 kvadratmeter spont. För analysen antas det 200 kvadratmeter spont inklusive hammarband och stämp per lastbil. Den totala arean spont som ska levereras är 3000 m^2 .

³Fredrik Larsson, biträdande arbetschef Peab Grundläggning region väst, mailkontakt den 30 mars 2020.

5 Metod

5.1 Geoteknisk analys

Säkerhetsklass 2 väljs för beräkningarna och γ_d får då värdet 0,91 enligt Tabell 2.2.

5.1.1 Laster

I beräkningarna antas det att inga gynnsamma laster förekommer för att få värsta fallet.

I beräkningarna antas det att största lasten ovan schaktgropen kommer från en gräv-maskin stående på stockmattor, placerad 1,5 meter från schaktkanten. Denna antas som en utbredd last med bredden fyra meter. Den totala dimensionerande lasten blir då 16.6 kN/m², se Bilaga A.

Vid släntanalysen används istället värdet för totalsäkerhet, vilket är 20 kN/m², se Bilaga B för detaljer.

5.1.2 Spont

Den geotekniska analysen för sponten genomförs med analytiska jämviktsberäkningar med hjälp av *Spontprogrammet*, version 2.99 (GeoMind KB, UÅ). Val av parametrar görs enligt Fredriksson m. fl. (2018). *Spontprogrammet* använder sig av Rankines jordtrycksteori vilken är beskriven i avsnitt 2.5.

Sponten är slagen och för den används hammarband som stöttas med stämp, placerad på nivån -1,0 m under markytan. Det antas att sponten slås 180 meter i taget, och sedan återanvänds längs med schaktsträckan. Det antas att dessa 180 meter spont inklusive hammarband och stämp är återanvända från tidigare projekt. Figur 5.1 visar stämpad spont från referensprojektet.

Sponten är av typ PU12 och hammarbanden samt stämpan är av typ HEB300 S355.



Figur 5.1: Stämpad spont i referensprojektet E45 Lilla bommen - Marieholm, copyright Anton Gunnebrink (2020)

Modellfaktorer

Modellfaktorer väljs enligt avsnitt 2.6.1.

Den lastbärande faktorn N_{cb} avläses i Figur 2.8. För att få ett generellt fall väljs $\frac{B}{L}$ till 0,5 och bredden antas i beräkningarna vara oändligt stor vilket ger ett värde på $N_{cb} = 5,7$.

$\gamma_{S;da}$ ökas med 0,2 på grund av tjäle eftersom arbetet förväntas pågå under vintertid och minskas med 0,1 då det antas övervakning utan larm. Detta ger ett värde på $\gamma_{S;da}$ på 1,1.

$\gamma_{R;dp}$ ökas med 0,1 på grund av övervakning utan larm, vilket ger ett värde på $\gamma_{R;dp}$ på 1,1.

$\gamma_{Sd;Ncb}$ sätts till 1,0.

Omräkningsfaktor för spontkonstruktion

$\eta_1 - \eta_4$: En normalt bra markundersökning ger ett värde på $\eta_1 - \eta_4 = 0,95$.

$\eta_5 - \eta_6$: Eftersom stor jordvolym är involverad och att spontytan är större än 200 kvadratmeter sätts $\eta_5 - \eta_6 = 1,1$.

$\eta_7 - \eta_8$: Sätts till 1,0 eftersom detta ofta används för lera enligt Gunnebrink¹.

Detta ger ett totalt värde på $\eta = 1,05$.

Stämp

Den profil som valts att användas som stämp, HEB300, är kompakt varför det antas att tvärsnittet är i tvärsnittsklass 1 eller 2. Då ges hammarbandets momentkapacitet av ekvation 2.8, där W_{pl} är plastiskt böjmotstånd vilken är $870,1 \text{ cm}^3$ för HEB300 enligt Tibnor (2018) och f_{yd} är sträckgränsen för stålqualiteten, dvs 355 MPa dividerat med partialkoefficienten γ_{M0} vilken är 1,0 oavsett tvärsnittsklass.

Det antas att normalkraften inte har någon inverkan på bärförmågan, dvs $N = 0$.

Hammarbandet utsätts för momentet som beräknas enligt ekvation 2.9. L i denna ekvation löses ut där värdet på M_{sxd} beräknas med hjälp av ekvation 2.8.

Därefter kontrolleras det att stämpan klarar den horisontella hammarbandslasten utan att risk för knäckning föreligger. Detta dimensioneras efter Tibnor (2018) där bärförmåga i styv samt vek riktning för olika längder visas.

Stabilitet av schaktbotten

Det antas inte finnas risk för hydraulisk bottenuppträckning eller hydrauliskt grundbrott eftersom detta främst uppstår i gränser mellan lera och grovkornigare material, enligt avsnitt 2.3. Därför kontrolleras inte detta.

5.1.3 Slänt

Släntlutningen väljs till 1:1,5 i samråd med Gunnebrink¹, då detta är ett värde som vanligen används i Göteborgsområdet.

Säkerhetsfaktorn ska enligt Tabell 2.5 vara minst 1,50 då säkerhetsklass 2 valts.

Vid släntanalys antas skjuvhållfastheten vara $\tau_d = \frac{c_u}{1,5}$ (Tudisco och Dahlblom, 2017).

För säkerhetsklass 2 beräknas den verkande lasten på slänten enligt ekvation 5.1 (IEG, 2008a).

$$Geo.last = 0,91 \cdot 1,1 \cdot G_{kj} + 0,91 \cdot 1,4 \cdot Q_{kj} \quad (5.1)$$

Det analytiska programmet *Geoslope* (Seequent, UÅ) används för att verifiera att slänten, med lutning 1:1,5, uppfyller krav på säkerhetsfaktor enligt Tabell 2.5. Pro-

¹Anton Gunnebrink, geokonstruktör/geotekniker Peab Anläggning, personlig kontakt den 25 februari 2020.

grammet söker efter det värsta fallet i ett bestämt antal punkter, och får därigenom ut säkerhetsfaktorn för det värsta fallet. Indata i *Geoslope* är materialparametrar enligt avsnitt 4.1 och last enligt avsnitt 5.1.1.

5.2 Miljöpåverkan

Då verket Klimatkalkyl är speciellt framtaget av Trafikverket för infrastrukturprojekt väljs detta för att bedöma miljöpåverkan för referenssektionen. Modellversion 6.1 Trafikverket (2018a) används för beräkningarna och samtliga värden som presenteras är hämtade härifrån om inget annat anges. Klimatkalkyl tar enligt avsnitt 2.7.1 endast hänsyn till byggskede och drift- och underhållskede. Denna metod kan vara lämplig för att jämföra två olika alternativ eftersom det är en kvantitativ metod. Släntning och spontning jämförs med utgångspunkt från Klimatkalkyl och den miljöpåverkan användandet av dessa bidrar till. I undersökningen beräknas endast koldioxidekvivalenter, energiåtgången tas ej hänsyn till. Resultatet från klimatkalkylen är uppdelat i byggskede och driftskede. I analysen tas endast klimatbelastningen från byggskedet med, eftersom val av temporär stödkonstruktion under byggskedet inte har någon påverkan på slutprodukten och ger därmed samma miljöbelastning under driftskedet.

Klimatbelastningsanalyser för spont respektive slänt skapas med hjälp av Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl, modellversion 6.1 (Eklöf, 2018). Samtliga värden nedan är hämtade från detta verktyg. Spontkonstruktionen är temporär och antas vara återanvänd från tidigare projekt. I Göteborgsområdet antas en temporär spont kunna återanvändas 15 gånger, det vill säga att en femtondel, 6,7 %, av spontens totala klimatbelastning räknas in per användning. Sponten i referensprojektet slås i 8 delar vilket innebär att den antas kunna återanvändas 7 gånger utöver referensprojektet. I Trafikverkets klimatkalkyl är tätsponton av typen PU16, avsedd för schaktgrop och har massan 122 kg/m². Klimatpåverkan för tätsponton är 1,5 kg CO₂e/kg stål och detta är ett generellt EU-värde enligt Trafikverket (2018b). Detta ger att tätsponton har en klimatbelastning på 183 kg CO₂e/m² spont. Detta värde gäller för en ny spont och det tar därmed ingen hänsyn till eventuell återanvändning. Vidare består stålet i sponten av 59 % återvunnet material enligt Trafikverket (2018a).

Jordschakt, fall B används i modellen och massorna måste alltså transporteras bort. I klimatkalkylen innefattas arbetsmomentet *Jordschakt, fall B* av grävmaskin och borttransport av massorna med lastbil.

Grävmaskinen har i modellen en skaktkapacitet på 55 m³/h och en förbrukning på 10,2 liter diesel (MK1) per timme. Emissionsfaktorn för grävmaskinen är 2,88 kg CO₂e/liter, där förbränning inklusive produktion och distribution ingår.

Lastbilen har emissionsfaktorn 0,11 kg CO₂e per tio kilometer och detta innefattar transport av schaktmassorna.

Trafikverket (2020a) har beräknat utsläpp av koldioxidekvivalenter till följd av transporter av schaktmassor, här betecknat E_{CO₂} [kgCO₂], enligt följande:

$$E_{\text{CO}_2} = V_{\text{jord}} \cdot \rho_{\text{jord}} \cdot s \cdot e_{\text{CO}_2} \quad (5.2)$$

där V_{jord} är volym schaktmassor [m^3], ρ_{jord} densitet för schaktmassor [ton/m^3], s transportsträcka [km] och e_{CO_2} emissionsfaktor för lastbilarna [$\text{kgCO}_2/\text{ton km}$].

I denna beräkning finns därmed ingen beräknad kapacitet för lastbilen, det vill säga hur många kubikmeter schaktmassor som går åt för en lastbil, eller hur många lastbilar som krävs för en viss mängd schaktmassor.

De schablonvärden som Trafikverket angett i Klimatkalkyl används, med undantag för avstånd till deponi, som är angivet till 10 km tur och retur. Denna sträcka har ändrats till 140 kilometer tur och retur, då detta är det som gällt för referensprojektet.

5.3 Kostnader

Kostnader för referenssektionen uppskattas för användning av slänt och spont, och jämförs sedan. Priserna hämtas internt från Engström² och Larsson³. Priserna är endast uppskattningar och används för att kunna göra jämförbara mätningar. De priser som används är:

- Tippavgift >KM<MKM 200 kr/ton inkl transport
- Tippavgift <KM 150 kr/ton inkl transport
- Tippavgift IFA 350 kr/ton inkl transport
- Tippavgift FA 550 kr/ton inkl transport
- Grävmaskin 800-1500 kr/h, i beräkningar antas denna kostnad vara 1000 kr/h
- Profilerad stålspont PU12 395 kr/ m^2
- Hammarband HEB300 1475 kr/m
- Stämp HEB300 6145 kr/styck
- Etablering spontmaskin + 2 st smeder 20 645 kr/etapp

De förutsättningar som används för kostnadsanalysen är:

- Schakttvärsnitt enligt avsnitt 4.1
- Spont slås om 180 m i taget, totalt 8 deletapper på sträckan 1500 m

²Anders Engström, platschef Peab Anläggning region väst, mailkontakt den 27 mars 2020.

³Fredrik Larsson, biträdande arbetschef Peab Grundläggning region väst, mailkontakt den 30 mars 2020.

- Kapacitet lastbilar 32 ton/lastbil enligt avsnitt 4
- Massorna klassas som >KM<MKM
- Kapacitet för grävmaskin vid spontning: 40 m³/h, kapacitet för grävmaskin vid släntning: 55 m³/h
- För spont antas det att varje etapp tar 2 månader
- Kostnad för lastbilars eventuella väntetid på entreprenaden tas ej hänsyn till i kostnadsanalysen

5.4 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys används för att analysera hur ändringar av parametrar i en modell kan ha påverkan på slutresultatet (Upphandlingsmyndigheten, 2017).

Känslighetsanalyser görs för både den ekonomiska jämförelsen samt i Klimatkalkyl. Bedömningar för huruvida slutresultatet påverkas av andel återanvänd spont, avstånd till deponi samt klassning av schaktmassorna avseende föroreningsgrad.

Förändring i andel återanvänd spont

De känslighetsanalyser i Klimatkalkyl (Trafikverket, 2018a) som görs avseende andel återanvänd spont är:

- sponten slås i etapper om 180 meter och sponten är helt ny, det vill säga ingen andel antas kunna återanvändas
- sponten slås i etapper om 180 meter och hälften av sponten är återanvänd och hälften av sponten är ny

Detta jämförs med det fall där sponten antas vara återanvänd 15 gånger. I klimatberäkningarna räknas därför 6,7 % av sponten som ny. Klimatbelastningen för detta adderas med klimatbelastningen för masshanteringen vid spontning.

Minskat avstånd till deponi

Avståndet till deponi ändras i Klimatkalkyl till 8 km enkel resa, vilket var det deponiavstånd som var kortast från referensprojektet enligt Engström⁴ Beräkningar görs i Klimatkalkyl (Trafikverket, 2018a).

Spontens klimatbelastning adderas och antas ha samma förutsättningar för nedslagning och återanvändning som referenssektionen enligt avsnitt 5. Spontens teknologi och tillverkning ingår i denna analys med värde enligt avsnitt 6.2.

⁴Anders Engström, platschef Peab Anläggning region väst, mailkontakt den 27 mars 2020.

Kostnader vid ändring av andel MKM- och KM-massor

En känslighetsanalys görs för hur tippavgifterna hade förändrats för spont respektive slänt om schaktmassorna skulle bestått av 75 % >KM<MKM och 25 % < KM. Kostnaderna som används hämtas från Engström⁵.

⁵Anders Engström, platschef Peab Anläggning region väst, mailkontakt den 27 mars 2020.

6 Resultat

Totala mängden schaktmassor som uppkommer för de två alternativen visas i Tabell 6.1. Schaktvolymen för släntning är beräknad för slänt med schaklutningen 1:1,5.

Tabell 6.1: Schaktvolym

	Längd [m]	Tvärsnittsarea [m ²]	Schaktvolym [m ³]
Spont	1500	20	30 000
Slänt	1500	44	66 000

6.1 Geoteknisk analys

6.1.1 Spont

Spontens totala längd bestäms till 8,1 meter, se Bilaga A. Detta innebär att sponten ska slås ner 4,1 meter under schaktbotten.

Stämp

Den horisontella hammarbandslasten blir enligt Bilaga A $q_{h,Ed} = 79,7$ kNm.

Hammarbandets momentkapacitet beräknas med hjälp av ekvation 2.8 till 308,9 kNm. Detta värde i ekvation 2.9 ger ett värde på $L = 6,8$ meter. Till följd av detta väljs c/c -avståndet på stämpan till 6,5 meter. Denna längd har enligt Tibnor (2018) en bärförmåga i vek riktning på 2470 kN, vilket jämförs med den horisontella hammarbandslasten multiplicerat med valt c/c -avstånd:

$$c/c \cdot q_{h,Ed} = 6,5 \cdot 79,9 \cdot 10^3 = 518,1 < 2470 \Rightarrow OK \quad (6.1)$$

6.1.2 Slänt

Geoslope beräknade ett värde på säkerhetsfaktorn till 1,55, se detaljer i Bilaga B. Trafikverkets krav på säkerhetsfaktor är 1,50 för säkerhetsklass 2 vilket innebär att den beräknade släntlutningen uppfyller detta krav.

6.2 Miljöpåverkan

6.2.1 Klimatbelastning för masshantering

I resultatet från Trafikverkets Klimatkalkyl version 6.1 (Trafikverket, 2018a) är endast den totala mängden koldioxidekvivalenter under byggskedet av intresse för analysen. Resultatet från de två metoderna för visas i Tabell 6.2.

Tabell 6.2: Resultat Klimatkalkyl [tonCO₂e], endast utsläpp till följd av masshantering

	Spont	Slänt
Bygg totalt	728	1602

Detaljer kan ses i Bilaga C, Figur C.1 och Figur C.2.

6.2.2 Klimatbelastning för återanvänd spont

Värden för spontens teknologi och tillverkning ger enligt avsnitt 5.2 utsläpp för varje användning på:

$$183 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2 \cdot 1440 \text{ m}^2 / 15 \text{ återanvändningar} = 17,6 \text{ ton CO}_2\text{e}$$

För de 8 deletapper i referensprojektet ger detta då ett totalt utsläpp på 140,8 ton CO₂e.

6.3 Kostnader

Kostnad för alternativet med spontkonstruktion blir 26,3 miljoner kronor och kostnad för alternativet med släntning blir 23,6 miljoner kronor, se Tabell 6.3.

Tabell 6.3: Resultat från kostnadsanalys för spontning och släntning

Spont	
1 etapp, 187 m	1 925 kkr
8 etapper, 1500 m	15 397 kkr
Tippavgift	10 200 kkr
Grävmaskin	750 kkr
Totalt	26 347 kkr
Slänt	
Tippavgift	22 440 kkr
Grävmaskin	1 200 kkr
Totalt	23 640 kkr

6.4 Känslighetsanalys

Förändring i andel återanvänd spont

Om sponten köps in och inte kan återanvändas efter projektet, det vill säga att 100 % av sponten är ny, blir resultatet i Klimatkalkyl utsläpp enligt Figur C.3. Om 50 % av sponten kan återanvändas och 50 % av sponten är ny, blir resultatet i Klimatkalkyl utsläpp enligt Figur C.4. Om sponten antas kunna återanvändas 15 gånger, vilket ger att 6,7 % av tillverkningen beaktas, ger detta utsläpp enligt avsnitt 6.2.2, vilket adderas med klimatbelastningen för masshanteringen för spont enligt avsnitt 6.2. Tabell 6.4 visar klimatbelastning för de tre alternativen.

Tabell 6.4: Klimatbelastning [tonCO₂e] för olika förutsättningar för sponten

	Bygg totalt [tonCO ₂ e]
100 % ny spont	1277
50 % ny spont	1003
6,7 % ny spont	869

Minskat avstånd till deponi

Om avståndet till deponi minskas till 8 km enkel resa, skulle detta ge utsläpp på 97 respektive 214 ton CO₂e för spontkonstruktion respektive slänt, se Figur C.5 och C.6. Då spontens teknologi och tillverkning inkluderas i en klimatbelastningsanalys ger detta resultat enligt Tabell 6.5 för olika avstånd till deponi.

Tabell 6.5: Klimatbelastning [tonCO₂e] för olika deponiavstånd med spontens teknologi och tillverkning inkluderat

Avstånd till deponi	70 km	8 km
Spont	869	238
Slänt	1602	217

Kostnader vid ändring av andel MKM- och KM-massor

I kostnadsanalysen för referenssektionen antogs det att alla massor bestod av >KM<MKM. Om schaktmassorna istället skulle bestå av 75 % >KM<MKM och 25 % < KM skulle tippavgifterna blivit enligt Tabell 6.6.

Tabell 6.6: Kostnader för tippavgifter om 75 % av massorna är >KM<MKM och 25 % är <KM

Spontkonstruktion	9 563 kkr
Släntning	21 038 kkr

7 Analys

7.1 Val av stödkonstruktion

Flera faktorer har betydelse vid val av stödkonstruktion. Från litteraturstudien över olika typer av temporära stödkonstruktioner i lera verkar schaktdjupet vara den avgörande faktorn. För schaktdjupet i referenssektionen anses spont vara det mest lämpliga alternativet till slänt och således jämförs endast dessa två alternativ. Hade däremot schaktdjupet ökat kan det tänkas att någon av de övriga metoderna som tagits upp i avsnitt 3.1 kunnat vara mer lämplig.

Från avsnitt 3.1 kan slutsatsen dras att både sekantpålning och slitsmur är dyra metoder jämfört med spont. Båda metoderna kan dock användas vid större schaktdjup, omkring 20 meter. Båda stödkonstruktionerna innehåller betong, vilket medför stor påverkan på klimatet. Det kan därför tänkas att dessa är lämpligare som permanenta stödkonstruktioner som avses för en längre tid, eftersom en temporär stödkonstruktion ofta har kort livslängd. Slitsmur är dyrare än sekantpålning, men möjliggör grundläggning på ett ännu större djup. Det framgår dock ur litteraturstudien att slitsmur främst är lönsam som permanent konstruktion.

Vid vissa förutsättningar i projekt skulle också slitsmur kunnat vara fördelaktig att använda vid mindre schaktdjup, exempelvis som i fyrspårsutbyggnaden mellan Lund och Arlöv vilket är beskrivet i avsnitt 3.1.2. Referensprojektet E45 Lilla bommen - Marieholm innefattar också tunnel och det kan därför tänkas att en slitsmur hade kunnat vara användbar även i detta projekt. Eftersom tunnelväggar av betong ändå krävdes bör slitsmuren inte ha någon ytterligare påverkan på klimatet och en stor del massor hade kunna undvikas att schakta bort jämfört med släntning. Huruvida det skulle vara kostnadsmässigt lönsamt att använda slitsmurar som permanenta tunnelväggar har dock inte analyserats i detta arbete.

7.1.1 Geoteknisk analys

Den temporära spontens längd beräknades i *Spontprogrammet* till 8,1 meter i brottgränstillstånd. *Spontprogrammet* är ett analytiskt program, om istället mer avancerade beräkningar med hjälp av till exempel finita element-program använts för dimensionering hade eventuellt spontens längd kunnat optimeras. Detta är dock både tidskrävande och dyrt och skulle troligtvis inte medföra stor påverkan på slutresultatet.

Släntlutningen gav ett värde på säkerhetsfaktorn $F_c = 1,55$ i jämförelse med Trafikverkets krav på minst 1,50. Visserligen hade säkerhetsfaktorn kunnat optimeras, vilket gett en något brantare slänt som resultat. Detta hade minskat mängden schaktmassor något. Med tanke på att säkerhetsfaktorn ligger nära kravet är dock detta inte något som bör ge betydande påverkan på slutresultatet, varken avseende miljöbelastning el-

ler kostnader. Vidare kan det även antas vara svårt att i produktionen schakta med exakt den teoretiskt beräknade släntlutningen.

7.2 Miljöpåverkan

Klimatbelastningsanalysen över släntning och spontning genomfördes med Trafikverkets verktyg för livscykelanalys, Klimatkalkyl, version 6.1. Om endast hantering av massor för de två alternativen jämförs gav detta ett klimatavtryck på 728 ton CO₂e för 30 000 m³ schaktmassor för sponten. Motsvarande siffra för slänten var 1602 ton ton CO₂e för 66 000 m³ schaktmassor. Detta grundar sig i en kapacitet hos grävmaskinerna på 55 m³/h och att avståndet till deponi för schaktmassorna är 140 km tur och retur. Något som inte tagits hänsyn till är en eventuell skillnad i kapacitet hos grävmaskinerna för schaktarbeten vid slänt respektive spont. Ett trångt arbetsområde skulle kunna sänka denna kapacitet något.

För en spont som beräknas kunna återanvändas 15 gånger beräknades utsläppet till 17,6 ton CO₂e enligt avsnitt 6.2.2 per användning. I referenssektionen antas det att hela spontkonstruktionen är återanvänd från tidigare projekt. En förutsättning för att använda stämp är dock att den har exakt rätt längd för den schaktbredd som krävs. Detta kan göra det svårt att återanvända inom andra entreprenader.

I klimatkalkylen tas inte transport av material till och från arbetsplatsen hänsyn till, vilket i detta fall har påverkan för alternativet med spont. Beroende på hur stor mängd spont som ska transporteras och hur många leveranser som krävs kan detta ha en betydande påverkan på den totala klimatbelastningen.

Lastbilarna för referensprojektet har kapaciteten 32 ton per lastbil enligt avsnitt 4. För referenssektionens schaktmassor enligt Tabell 6.1 skulle det krävas 1595 stycken respektive 3510 stycken lastbilar för spont respektive släntning. Det skulle alltså krävas ungefär det dubbla antalet lastbilar för alternativet med släntning, vilket skulle få stor påverkan på klimatet med rådande avstånd till deponi.

I Klimatkalkyl har det inte någon betydelse för utsläpp av koldioxidekvivalenter huruvida schaktmassorna transporteras med ett färre antal större lastbilar eller med fler mindre. Modellen tar endast hänsyn till sträckan som ska köras. Eftersom alternativet med spontkonstruktion ger mindre volym schaktmassor att transportera bort bör detta alternativ således vara bättre ur miljösynpunkt vid rådande avstånd till deponi.

7.3 Kostnader

En kostnadsanalys görs för att ge en uppfattning om skillnader i kostnader för de två alternativen, spontning och släntning. Resultatet blev att alternativet med spontkonstruktion blev 2,7 miljoner kronor dyrare, det vill säga 11%, än släntalternativet för referenssektionen. Kostnaden för respektive alternativ varierar beroende på förutsättningar i varje projekt samt vilken entreprenör som utför arbetet. Kostnaden är inte heller

fullständig, samt kan ändras beroende på de förhållande som råder för gällande tidpunkt. Stämpens c/c-avstånd hade kunnat sättas till 6,8 meter istället för 6,5 meter som valts, därmed hade spontkonstruktionen kunnat bli något billigare. Anledningen till att c/c-avståndet valdes till 6,5 meter var för att kunna dimensionera enligt leverantörens konstruktionstabeller. Detta bör dock inte ha stor påverkan på kostnaden. Det kan tänkas att väntande lastbilar skulle kunna förekomma i ett projekt, framförallt om det är ett trångt arbetsområde. Detta är inte något som tagits hänsyn till i kostnadsanalysen, eftersom dessa kostnader bör vara någorlunda likvärdiga för de två alternativen.

För alternativet med spontkonstruktion utgörs majoriteten av totalkostnaden av material, följt av tippavgifter för schaktmassorna. För alternativet med släntning utgör tippavgiften majoriteten av totalkostnaden. Kostnaden för grävmaskin har inte stor påverkan för något av alternativen. Tippavgiftens totalkostnad är direkt beroende av mängd schaktmassor. För att erhålla en lägre totalkostnad, oberoende av valt alternativ, verkar det alltså vara av stor vikt att minimera schaktmassor som ska transporteras till deponi.

7.4 Käslighetsanalys

7.4.1 Spont

I känslighetsanalysen där påverkan från andel återanvänd spont analyseras används samma emissionsvärde för utsläpp till följd av spontens teknologi och installation som tidigare. I känslighetsanalysen gjordes klimatkalkyler över hur utsläppen av koldioxid ekvivalenter förändras då hela respektive hälften av spontkonstruktionen består av nytt material som inte kan återanvändas.

I Göteborgsområdet har det antagits att sponten kan återanvändas upp till 15 gånger. Skulle spont däremot slås i områden med andra markförhållanden kan det tänkas att den inte kan återanvändas samma antal gånger. I hårdare jordar kan sponten eventuellt bara användas en gång innan den måste bytas ut. Detta ger andra värden på utsläpp vilket är anledningen att känslighetsanalyser gjorts för detta. Det visade sig att andel återanvänd spont har stor betydelse för totalt utsläpp av CO₂e och i projekt bör det därför eftersträvas att använda så stor andel återanvänd spontkonstruktion som möjligt.

Den massa som används i Klimatkalkyl är 122 kg/m² vilken gäller för spontprofil PU16. Emellertid är det oklart om övriga spontkonstruktionsdelar som till exempel hammarband, stag och stämp ingår i detta värde, vilket det antas inte göra då det i så fall bör framgå. Den stålprofil, PU12, som används i detta arbete har en massa på 110 kg/m². Anledningen till att värdet för PU16 ändå användes är att det antas att denna massa är representativ om hammarband och stämp också ingår.

7.4.2 Masshantering

Enligt Klimatkalkyl blev utsläppen för hela schaktvolymen, om den närmre belägna deponin hade kunnat användas istället, 97 respektive 214 ton CO₂e för spont respektive slänt. Detta kan jämföras med 728 och 1602 ton CO₂e för den faktiska sträckan till deponi. I Tabell 6.5, där spontens teknologi och installation också inkluderas i en klimatbelastningsanalys, kan det utläsas att minskat avstånd till deponi av schaktmassor har mycket stor betydelse för de totala utsläppen.

Gällande klassning av massor kan detta få stora konsekvenser för kostnader eftersom avgiften för deponering är dyrare för förorenade massor jämfört med rena. I referenssektionen antas det att hela schaktvolymen består av jord klassad som >KM<MKM. Det har inte gjorts någon känslighetsanalys över huruvida resultatet förändrats om marken bestått av FA-massor. Eftersom deponiavgift för FA är betydligt högre jämfört med mindre förorenade massor, enligt avsnitt 5.3, hade totalkostnaden blivit avsevärt högre.

7.5 Förbättring av Klimatkalkyl

Som nämnt i avsnitt 2.7.1 använder Klimatkalkyl schablonvärden för beräkningar av klimatpåverkan. Dessa värden kan således förbättras och göras specifika för referensprojektet. Verktuget tar inte heller hänsyn till en produkts slutskede. Infrastrukturprojekt har generellt en livslängd på många år, därför utvärderas inte en eventuell framtida avveckling. För en temporär spont däremot, som har kort livslängd och endast är avsedd att användas vid schaktning under byggtiden, kan detta vara värt att beakta vid bedömning av klimatpåverkan.

En av verktygets begränsningar är att transporter av material till och från arbetsplatsen inte beaktas. Vid stora mängder material samt om dessa måste transporteras en längre sträcka kan detta dock vara något som bör beaktas. Den temporära spontkonstruktionen antas behöva transporteras iväg för rengöring efter tre etapper enligt avsnitt 4.1. Om en lastbil har kapaciteten att lasta 200 kvadratmeter spont inklusive stämp och hammarband, ger detta således $3000/200=15$ st leveranser av spont per tillfälle. Detta ger totalt 45 levanser. Då avståndet mellan Göteborg och Karlstad, där sponten i referenssektionen antas levereras från, är cirka 250 km ger detta en total körsträcka på $250 \cdot 15 = 11\,240$ km.

Om samma emissionsfaktor antas för transporter av spont som för schaktmassor, 0,11 kg CO₂e /tkm, och sponten som ska transporteras väger $110 \text{ kg/m}^2 \cdot 2916 \text{ m}^2 = 321$ ton, ger detta ett emissionsvärde på 39,7 ton CO₂e för 45 stycken leveranser. Denna beräkning innefattar dock endast leverans av sponten till arbetsplatsen, och inte borttransport. Denna siffra får betydelse i klimatbelastningsberäkningarna för det kortare deponiavståndet. För avståndet på 70 kilometer är dock fortfarande transport av schaktmassor den avgörande faktorn och ett tillägg för transporten av spont får ingen avgörande betydelse.

Emissionsvärdet för stålet ($183 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$) som används för sponten är ett generellt värde för tillverkning, där 59 % av stålet antas vara återvunnet material (Trafikverket, 2018a). Ett faktiskt värde för spont som kan användas i Göteborgsområdet kan därför istället användas för att ge ett mer exakt värde än Trafikverkets schablonvärde. Enligt Larsson¹ använder tillverkaren Arcelor stål från skrot för tillverkningen av sponten. Det kan därför tänkas att större delen av sponten består av återvunnet material och att Trafikverkets värde på 59 % återvunnet material är användbart i denna analys. Om större andel av sponten hade bestått av skrot hade emissionsvärdet för sponten troligen minskat och klimatbelastningen för denna hade då också minskat. Så stor andel återvunnet material som möjligt bör därför eftersträvas för sponten.

Verktuget Klimatkalkyl är under utveckling och har idag vissa begränsningar. Om ett mer utförligt resultat eftersträvas bör en livscykelanalys vara en lämpligare metod. En LCA tar också hänsyn till produkters slutskede, vilket inte Klimatkalkyl gör. Detta kan tänkas ha påverkan i fallet för spontkonstruktionen. LCA tar också hänsyn till samtliga transporter som uppkommer i samband med projektet vilket inte Klimatkalkyl gör. LCA har även, som nämnt i avsnitt 2.7.1, en ingång som värderar möjligheten att återanvända eller återvinna en produkt, vilket kan vara en lämplig faktor att ha med i bedömningen av miljöbelastning. Metoden är mer exakt och kan göras projektspecifik, däremot är den komplicerad och tidskrävande. Det kan tänkas att det varierar från fall till fall hur noggrann analysen behöver vara och huruvida Klimatkalkyl är tillräckligt noggrann för ett projekt.

Om klimatbelastning skulle jämföras för övriga stödkonstruktioner som analyserats i rapporten kan det tänkas att en fullständig livscykelanalys hade varit en mer passande metod än Klimatkalkyl. Detta med tanke på den ingång i LCA som tar hänsyn till återanvändning- och återvinningsmöjligheter hos produkter. Troligtvis är slitsmur och sekantpålning svåra att återanvända i andra projekt, oavsett om de är avsedda som temporära eller permanenta stödkonstruktioner. Detta kan jämföras med temporär spont som antas kunna återanvändas 10 till 15 gånger i Göteborgsregionen. Troligtvis är detta en betydelsefull faktor vid bedömning av vilken stödkonstruktion som är bäst ur miljösynpunkt. Detta utreds dock inte vidare i denna rapport.

7.6 Värdering av klimatpåverkan

Att kunna värdera minskade koldioxidutsläpp ur ett ekonomiskt perspektiv torde vara av stor vikt för både beställare och entreprenörer i bygg- och anläggningsprojekt. Metoder för att bedöma klimatbelastning i projekt är något som Trafikverket och andra offentliga beställare bör utnyttja och på så sätt bidra till att klimatmålen uppnås. Om det som anbudsgivare går att redovisa hur ett tänkt arbetssätt påverkar klimatet kan detta värderas i anbudsutvärderingen. Därför bör det vara av stor vikt för anbudsgivare att kunna påvisa detta. Exempelvis skulle Trafikverket kunna ställa som krav att alla anbudsgivare i alla typer av projekt måste redovisa klimatbelastningen i Klimatkalkyl redan i anbudsskedet för att på så sätt enkelt kunna göra bedömningar.

¹Fredrik Larsson, biträdande arbetschef Peab Grundläggning region väst, mailkontakt den 30 mars 2020.

8 Alternativ masshantering

Transport av schaktmassor har stor effekt på den miljöpåverkan som ett bygg- eller infrastrukturprojekt ger upphov till. För att i framtiden kunna minska utsläppen som uppstår bör möjligheterna att minska transporter utredas. Lera, i synnerhet den lösa Göteborgsleran, är ofta olämplig att återanvändas inom entreprenaden som exempelvis fyllnadsmaterial till följd av dess låga bärformåga och sättningsbenägenhet (Hammarstrand och Millander, 2015). I detta avsnitt diskuteras därför olika metoder för att effektivisera hanteringen av lermassor.

8.1 Återanvändning av lera inom och utanför entreprenaden

Det torde vara av intresse för entreprenörsfirmor inom bygg- och anläggningsbranschen att minimera inköp av fyllnadsmaterial. Vid återanvändning av befintliga schaktmassor kan både ekonomiska och miljömässiga fördelar erhållas. Detta förutsätter att massorna uppfyller gällande krav avseende föroreningsgrad samt geotekniskt.

Beroende på om schaktmassornas föroreningsgrad kan de återanvändas på olika sätt i bygg- och anläggningsprojekt. Om massorna uppfyller gällande krav på bärighet för ändamålet kan de användas som fyllnadsmaterial, istället för alternativet att köpa och transportera nytt material till arbetsplatsen. Massorna kan också återanvändas till anläggande av exempelvis bullervallar, vilket gjorts i bland annat Burlövs kommun där 1 miljon kubikmeter schaktmassor återanvändes till bullervallar i ett järnvägsprojekt (Runol, 2011).

Loop Rocks

NCC lanserade år 2016 tjänsten Loop Rocks, en app framtagen för byggbranschen där material kunde avyttras mellan olika byggarbetsplatser (Breakit, 2019). Syftet var att minska transporter, utsläpp och lagringskostnader och appen riktade sig till både företag och privatpersoner. År 2019 lades dock tjänsten ner till följd av dålig lönsamhet och brist på externa investerare (Breakit, 2019). I dagsläget verkar dock intresset för att minska miljöbelastningen ha ökat inom byggbranschen och det kan därför tänkas att tjänsten kunnat få större användning om den lanserats idag.

8.2 Compressed Stabilized Earth Brick

Compressed Stabilized Earth Brick, CSEB, är en metod där jordmaterial tillsammans med tillsatser stabiliseras och kompakteras till block som sedan kan användas som byggelement. De har liten påverkan på miljön i jämförelse med framtagandet av betongblock eller tegel, då ingen förbränning krävs (Muntohar, 2011).

Andra fördelar i jämförelse med andra byggnadsmaterial är att lokala massor utnyttjas vilket reducerar kostnader för nytt material och för borttransportering av schaktmassor. På så sätt minskas också avfallsmängden och koldioxidutsläppen. Jordens sammansättning är den viktigaste parametern avseende blockens kvalitet. En jord som är helt obearbetad kan vara problematisk att använda på grund av att den sällan är helt homogen. Inblandning av friktionsmaterial, exempelvis sand, kan leda till en förbättrad slutprodukt. Stor andel lera har visat sig vara problematiskt vid användning av CSEB som väggelement till hus samt leder ofta till sprickor i blocken. För att undvika dessa problem bör lerhalten enligt Nagaraj m. fl. (2016) inte överstiga 16 %. Muntohar (2011) menar att sand förbättrar blockens egenskaper. Detta då det ökar densiteten för blocket, då sand är grövre och lerpartiklarna fyller upp tomrummen mellan sandkornen.

Ett problem är att jorden ofta saknar den hållfasthet, stabilitet och beständighet som krävs för att kunna användas som ett byggnadsmaterial. Jorden i CSEB behöver därför kompakteras och tillsättas med stabiliserande medel för att uppnå den nivå på hållfasthet som krävs. CSEB beräknas avge ungefär 22 kg koldioxid/ton jämfört med betong som avger 143 kg koldioxid/ton (Riza m. fl., 2010). Mellan 4-10 % av jordmaterialets vikt brukar adderas i cement vid tillverkning av CSEB. Om en större mängd än 10 % nyttjas blir oftast inte produktion av CSEB ekonomiskt lönsamt. Även kalk kan tillsättas för att öka stabiliseringen (Riza m. fl., 2010). Med avseende på förbättrande egenskaper så som hållfasthet, beständighet, reducering av vattenabsorption och högre böjmotstånd är en kombination av kalk och cement det bästa alternativet som tillsatsmedel (Nagaraj m. fl., 2016).

Idag används metoden med stabiliserade byggblock av lera främst i tropiska klimat. En undersökning gjord av Rempel och Rempel (2019) har visat att materialet även kan vara lämpligt i kallare klimat, trots att risk för frostsador finns. Resultatet visade att CSEB fungerar på samma sätt som betong eller tegel vid lägre temperaturer. I kalla kuststäder med mycket moln och lite solljus, som i de nordiska länderna, leder dock klimatet ofta till att elementen inte torkar, vilket gör att frostkänsligheten ökar (Rempel och Rempel, 2019). Det kan således tänkas att materialet kan vara problematiskt att använda i Sverige.

8.3 Rammed earth

Rammed earth är en metod som i många anseenden är lik Compressed Stabilized Earth Brick, beskrivet i avsnitt 8.2. Metoden rammed earth innebär att lokalt jordmaterial blandas med bindemedel på plats och kompakteras vilket skapar en stabilare och mer

hållfast undergrund. Hållfastheten och stabiliteten är starkt beroende av det lokala jordmaterialet (Kianfar och Toufigh, 2016). Den stora skillnaden jämfört med CSEB är att i rammed earth-metoden blandas jorden lokalt på plats, ofta i större volymer.

Stabilisering av jordmaterial med hjälp av rammed earth-metoden har enligt Kianfar och Toufigh (2016) blivit allt vanligare eftersom byggkostnader kan sänkas, mindre energi behövs och det befintliga lokala materialet kan återvinnas. Jordmaterialet som används vid rammed earth bör inte innehålla organiskt material eller ämnen som inte naturligt finns i marken (African Organisation for Standardisation, 2003). Jord innehållande exempelvis salter med sulfater kan störa bindemedlets verkan. Enligt African Organisation for Standardisation (2003) bör jordmaterialet vid stabilisering med rammed earth-metoden bestå av 50-70 % medelgrovkornigt material som till exempel fint grus och sand, 15-30 % slam och 5-15 % lera. Stabiliseringsmedel kan tillsättas i olika avseenden, exempelvis för att öka materialets hållfasthet, förbättra vattenmotståndet eller för att reducera krympning. Vanliga stabiliseringsmedel för detta syfte är cement och kalk (African Organisation for Standardisation, 2003).

8.4 Lera i stödkonstruktioner

Det skulle kunna tänkas att lera kan återanvändas i vissa typer av stödkonstruktioner. Genom att förstärka leran på något sätt vilket beskrivits i avsnitt 3.2 kan möjligheterna för återanvändning av materialet öka. Exempelvis skulle en del av betongen i en slitsmur eller sekantpålevägg bytas ut mot lera och ett bindemedel. Detta hade troligtvis inte kunnat ge samma bärighet som alternativet med enbart betong, men hade kunnat tänkas vara möjligt för en temporär stödkonstruktion vid mindre schaktdjup. Det hade också kunnat tänkas att en slitsmur skulle kunna utföras med rammed earth vilket beskrivits i avsnitt 8.3.

8.5 Stabilisering av lera

Göteborgsleran har, ur ett geotekniskt perspektiv, problematiska egenskaper. Det kan dock tänkas att modifiering av materialet skulle kunna öka möjligheterna till återanvändning av leran. Miljömässigt verkar det vara mest fördelaktigt att använda den befintliga lokala jorden och på så sätt helt undvika transport av schaktmassor.

Stabiliseringsmedel

Cement och kalk är de vanligaste stabiliseringsmedlen och båda fungerar att använda i lera. Däremot ger både cement och kalk negativ påverkan på miljön på grund av koldioxidutsläpp i samband med framställning av medlen. Resterande stabiliseringsmedel vilka är beskrivna i avsnitt 3.2.4 är rest- eller biprodukter från olika tillverkningsprocesser. Miljömässigt sett bör det alltså vara bäst att använda något av dessa

stabiliseringsmedel eftersom de ändå uppkommer i samband med produktion av andra produkter. Däremot är de så kallade sekundära tillsatsmedel vilket innebär att de behöver en aktivator, vanligen cement eller kalk. Dock bör detta ändå vara fördelaktigt sett till klimatbelastning.

Krossad stabiliserad lera

Lermassor skulle teoretiskt sett kunna återanvändas genom stabilisering av materialet med exempelvis kalk och/eller cement, dränering, härdning och sedan krossas i vald fraktion. Utförandet för detta skulle till exempel kunna vara att låta lermassorna härda i block, likt CSEB beskrivet i avsnitt 8.2. Det kan dock tänkas osannolikt att sådan här stabiliserad och krossad lera skulle kunna ge samma hållfasthet och bärighet som till exempel makadam, dvs. krossat bergmaterial. Den krossade leran skulle dock kunna användas för andra syften där krav på bärighet är lägre eller som en temporär lösning, exempelvis som temporärt obundet bärlager på arbetsplatsen.

8.6 Byggnadsmaterial av bränd lera

I detta avsnitt diskuteras huruvida överskott av lermassor i bygg- och anläggningsprojekt skulle kunna användas för produktion av byggnadsmaterial, exempelvis lättklinker och tegel.

Produktion av lättklinker

Lättklinker tillverkas av finkornig kalkfattig lera som upphettas i en roterande ugn till över 1000 grader (LECA, UÅ). Detta gör att leran expanderar och resultatet blir brända kulor med ett poröst inre omgivet av ett hårt skal. Materialet har flera användningsområden och kan användas som fyllnadsmaterial i till exempel husgrunder eller vägar och som dränerande material och vattenmagasin. Materialet får även isolerande egenskaper (LECA, UÅ).

Lättklinker har använts framgångsrikt inom byggbranschen. Materialet är särskilt användbart där vikt är ett problem, med tanke på dess låga densitet. Materialet har stor förmåga att reducera effekter av egentygnd och horisontella laster i konstruktioner och anläggande i lösa jordar. Materialet är naturligt framställt och utan miljöfarliga substanser. Det är beständigt mot frost och kemikalier och det är inte känsligt mot vatten. Materialet har använts sedan 1960-talet i många projekt och då främst för geotekniska tillämpningar (Zukri m. fl., 2018).

Leran som används vid produktion av lättklinker är en annan typ av lera än den i Göteborg, vilket beror på bildningssättet. Leran i Göteborg är således inte lämplig för just tillverkning av lättklinker, då denna får högre densitet efter bränning enligt

Andersson¹. Detta har i arbetet inte utretts vidare men kan vara av intresse för framtiden.

Produktion av tegel

Genom bränning av lera med hög temperatur kan tegelprodukter skapas (Stripple m. fl., 2015). Det är ett keramiskt material och tegel kan användas som till exempel fasadmateriel, murmateriel, takmateriel med mera. Tillverkningen av tegel består i kort av lerbearbetning med eventuella tillsatsmateriel, kompaktering, formning och ytbehandling, torkning, förbränning samt paketering (Stripple m. fl., 2015).

Hammarstrand och Millander (2015) har utrett olika hanteringsalternativ för överskottsmassor av lera i Västlänken. Ett av hanteringsalternativen som utretts är tegeltillverkning, vilket i rapporten gav större klimatpåverkan jämfört med utfyllnad i hamnområde men med fördelen att massorna återanvänds istället för att behandlas som avfall (Hammarstrand och Millander, 2015). För att lera ska kunna återanvändas för produktion av tegel måste massorna uppfylla vissa fysikaliska krav, vid behov kan leran förbehandlas genom exempelvis tillsättning av krympningsminskande (sand), porbildande (sågspån) eller färgpåverkande (kalk, mangan) materiel (Stripple m. fl., 2015).

¹Ola Andersson, Sales Manager Civil Engineering Leca Sverige AB, telefonsamtal den 16 april 2020.

9 Slutsats

Vid val av stödkonstruktion är schaktdjupet av stor betydelse. Större schaktdjup kan försvåra släntning eftersom risken för skred då ökar. Det kan också göra att en grövre spont krävs vilket ökar kostnaderna. Det kan därför tänkas att slitsmur eller sekantpålning hade varit mer ekonomiskt lönsamt vid ökat schaktdjup. Vid bebyggelse i stadsmiljö är arbetsområdet ofta trängre och även detta är något som bör tas hänsyn till vid val av stödkonstruktion. Detta eftersom vissa stödkonstruktioner lämpar sig bättre i trånga arbetsområden eller där omgivningen är känslig för exempelvis vibrationer och sättningar.

De kostnader som råder i referensprojektet för de två analyserade alternativen släntning och spontning är av samma storleksordning, sponten är dock något dyrare. Det antas att de två alternativen bör kunna anses som ekonomiskt jämförbara.

Eftersom betong ger upphov till stora utsläpp av koldioxid innebär detta att både slitsmur och sekantpålning troligtvis har hög klimatbelastning. Ett alternativ är dock att slitsmur troligen först hade kunnat användas som stödkonstruktion under schaktarbetet och sedan som permanenta tunnelväggar. Eftersom tunnelväggarna i den färdiga entreprenaden kommer att bestå av betong hade detta troligtvis inte inneburit ökat utsläpp av koldioxidekvivalenter. Detta har inte utretts vidare i arbetet men skulle vara intressant att undersöka både miljö- och kostnadsmässigt.

Huruvida massorna är rena eller förorenade har också stor betydelse på både kostnader och miljöpåverkan. Detta eftersom det avgör var de kan deponeras samt huruvida de kan återanvändas eller inte. Kostnaden är starkt beroende av föroreningsklassen och vid stor andel förorenade massor kan totalkostnaden därför blir mycket stor.

Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl har använts för samtliga beräkningar av utsläpp av koldioxidekvivalenter. Som nämnt i avsnitt 7.5 har verktyget brister eftersom parametrar som kan ha påverkan på resultatet inte alltid ingår. Dock kan metoden vara användbar om en översiktlig jämförelse mellan två metoder ska göras, då den antas ge ett tillräckligt tillförlitligt resultat för att kunna dra slutsatser avseende klimatavtrycket. I de fall där exakta värden för utsläpp efterfrågas är Klimatkalkyl dock inte tillräckligt noggrann. En fullständig livscykelanalys är då bättre då denna tar hänsyn till varje steg i framtagningen av en produkt, dock är metoden mer tidskrävande. Emellertid uppdateras verktyget Klimatkalkyl med jämna mellanrum och förbättringar och uppdateringar av det antas komma.

I Tabell 9.1 visas resultat avseende klimatbelastning för spontning respektive släntning för referenssektionen med olika förutsättningar avseende avstånd till deponi samt andel ny spont.

Tabell 9.1: Resultat klimatbelastning för spont och slänt med olika förutsättningar avseende avstånd till deponi och andel ny spont

Spont (schaktmängd 30 000 m ³)		
Avstånd till deponi	Andel ny spont	ton CO₂e
8 km	6,7 %	238
70 km	6,7 %	869
70 km	50 %	1003
70 km	100 %	1277
Slänt (schaktmängd 66 000 m ³)		
Avstånd till deponi		ton CO₂e
8 km		217
70 km		1602

Den viktigaste slutsatsen är att rådande avstånd till deponi är av störst betydelse ur ett miljöperspektiv, som nämnt i avsnitt 2.8 sparas 0,168 kg CO₂e för varje undviken transportkilometer kubikmeter av jordschakt fall B-massor. Detta blir tydligt vid jämförelse mellan spontning och släntning för avståndet 8 km respektive 70 km i Tabell 9.1. Trots att tillverkning av sponten och dess möjligheter för återanvändning har påverkan på klimatbelastningen, har ändå släntalternativet ett avsevärt högre värde för avståndet 70 km. Mängd schaktmassor har även påverkan och detta bör därför också tas hänsyn till vid val av stödkonstruktion. För referenssektionen med rådande förutsättningar med avståndet 70 km till deponi är alltså spont ett bättre alternativ avseende utsläpp av koldioxidekvivalenter.

Då sträckan som schaktmassorna transporteras har den avgörande betydelsen på klimatbelastningen bör således det bästa alternativet ur miljösynpunkt vara att undvika transporter i största möjliga mån. I linje med begreppet cirkulär ekonomi, där det ska förhindras att avfall uppstår, bör det ge miljömässiga fördelar att återanvända schaktmassor på plats alternativt att återanvända de på andra sätt.

10 Vidare studier

Hantering av schaktmassor är centralt avseende minskad klimatbelastning inom anläggningsprojekt. Vidare forskning på huruvida beställare kan värdera minskade utsläpp av växthusgaser och inkludera detta i upphandlingar anses författarna därför är av stor vikt. Mer exakta bedömningar över hur mycket klimatbelastning ett projekt ger upphov till anses också vara av vikt, genom att använda sig av livscykelanalyser som tar hänsyn till hela produktens livstid. Andra faktorer som kan vara intressanta att ta hänsyn till är exempelvis om stålet i spanten tillverkas i ett verk som drivs av förnyelsebara källor eller av kol.

Huruvida lermassor kan återanvändas inom eller utanför projekt är en aktuell fråga där mer forskning anses behövas för att kunna minska klimatbelastning i infrastrukturprojekt. Exempelvis huruvida Compressed Stabilized Earth Bricks av lera skulle kunna användas i Sverige som byggblock och om slitsmur och sekantpålning kan utföras med rammed earth-material istället för med betong. Användande av andra typer av stabiliseringsmedel i lerjord, bortsett från de två vanligaste cement och kalk, anses också vara något som kan vara intressant att utreda vidare. Exempelvis att undersöka huruvida lignin hade kunnat användas för detta syfte, likt det gjort i studien från Iowa vilket är beskrivet i avsnitt 3.2.4.

Något annat som hade varit intressant att utreda är jämförelser avseende miljö och kostnad mellan samtliga stödkonstruktioner som berörts i arbetet. Det hade även varit intressant att utföra analyser över hur resultatet beror av schaktdjupet.

Litteratur

- African Organisation for Standardisation (2003). *Rammed earth structures - code of practise*. SADCSTAN.
- Alén, Claes, Lindvall, Anders, Johansson, Morgan, Magnusson, Jonas och Norén, Christer (2006). "Slitsmurar som permanenta konstruktioner". I: *SBUF Utvecklingsprojekt 11603*.
- Alén, Clas, Bengtsson, Per-Evert, Bergdahl, Ulf, Eriksson, Leif, Larsson, Rolf och Sällfors, Göran (2007). *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord*. URL:<https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i3.pdf>. [Hämtad 2020-01-23].
- Arcelor Mittal (UÅ). *Kort om företaget*. URL:<https://www.arcelormittalbegroup.se/kort-om-foretaget>. [Hämtad 2020-03-31].
- Axelsson, K, Johansson, SE och Andersson, R (2000). "Stabilisering av organisk jord med cement-och puzzolanreaktioner - Förstudie". I: *Swedish Deep Stabilization Research Centre, Rapport 3*, s. 60.
- Axelsson, Kennet (2020). *Släntstabilitet*. URL:<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/slantstabilitet>. [Hämtad 2020-01-24].
- Björk, Rikard (2017). "Inget stoppar satsningarna i Göteborg". I: *Samhällsbyggaren 1*.
- Boverket (2019). *Introduktion till livscykelanalys*. URL:<https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>. [Hämtad 2020-02-06].
- (2020). *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. URL:<https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>. [Hämtad 2020-01-22].
- Bowles, Joseph E. (1988). *Foundation analysis and design — Fourth edition*. McGraw - Hill, Inc.
- Breakit (2019). *Byggjätten NCC lägger ner Loop Rocks: "Tajmingen var inte rätt"*. URL:<https://www.breakit.se/artikel/20099/byggjatten-ncc-lagger-ner-loop-rocks-tajmingen-var-inte-ratt>. [Hämtad 2020-04-06].
- Brons, Bengt, Sven, Hansbo och Carl-Eric, Wiesel (1985). *Skjuvhållfasthet — Geotekniska laborationvisningar*. Vol. 9. Byggforskningsrådet.
- ByggTeknik (2020). "Miljösmart byggmetod när tågtunnel byggs i Åkarp". I:
- Ceylan, Halil, Gopalakrishnan, Kasthurirangan och Kim, Sunghwan (2010). "Soil stabilization with bioenergy coproduct". I: *Transportation research record 2186.1*, s. 130–137.
- Davidson, D.T., Hoover, J.M och Sinha, S.P. (1957). "Lignins As Stabilizing Agents for Northeastern Iowa Loess". I: *Proceedings of the Iowa Academy of Science*.
- Deep excavation (UÅ). *Sheet pile walls - retaining systems for deep excavations: sheet pile walls*. URL:<https://www.deepexcavation.com/en/sheet-pile-walls>. [Hämtad 2020-02-03].
- Edstam, Torbjörn (2018). *Etappvis schakt i lös lera med nyttjande av konsolspont och hammarband*. SBUF, Skanska.

- Eklöf, Hanna (2018). *Klimatkalkyl - infrastrukturhållningens energianvändning och klimatpåverkan i ett livscykelerspektiv*. Trafikverket.
- Fossilfritt Sverige (2018). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft - Bygg- och anläggningssektorn*. URL : http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/01/ffs_bygg_anlgningssektorn181017.pdf. [Hämtad 2020-01-22].
- Fredriksson, Anders, Stille, Håkan, Kullingsjö, Anders och Ryner, Anders (2018). *Sponthandboken 2018-Dimensionering av temporära stödkonstruktioner*. Pålkommissionen.
- Frosth, Sandra, Lundberg, Kristina, Meurman, Fredrik, Johansson, Maria och AB, Ecoloop (2017). *Energieffektiv och cirkulär masshantering i Trafikverket genom extern samverkan - Fallstudie Södertörn*. Trafikverket TrV 2016/55462.
- GeoMind KB (UÅ). *Spontprogrammet*.
- Grabe, Jurgen och Osthoff, David (2018). "Deformational behaviour of steel sheet piles during jacking". I: *Computers and Geotechnics* 101, s. 1–10.
- Göteborgs Stad (UÅ). *Fylla ut mark*. URL : https://goteborg.se/wps/portal/start/foretag/tillstand-och-regler/bygga/fylla-ut-mark!/ut/p/z1/hY6xCsIwGISfpmv-v21soltAFKri2JpF2hLTQtOUNBrw6Y2joHjbcD9xBxJqkFPzGHTjBzs1Y_QXWVxptse0pOmB8zNDsRV0h8UpWoTqHyBjJd8kEEqQQ2tI6AxBgj1FlnP0cl asV8iy976Y2pxrkE7d1F003F281Xs_L5sEEwwhEG2tHhXprEnwW6W3i4f6k4TZ1M-jqsQL2dpLhA!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/. [Hämtad 2020-03-25].
- Hammarstrand, Lina och Millander, Johanna (2015). *LCA - Olika hanteringsalternativ för överskottsmassor från Västlänken*. EMOVE.
- Hercules Grundläggning (UÅ[a]). *Effektiv förankring med stag*. URL : <https://hercules.se/grundlaggning/stodkonstruktioner/stag/>. [Hämtad 2020-02-26].
- (UÅ[b]). *Profilerad spont*. URL : <https://hercules.se/grundlaggning/stodkonstruktioner/profilerad-spont/>. [Hämtad 2020-01-21].
- Hot, Dino och Swedmark, Markus (2014). *Utvärdering av temporära stödkonstruktioner*. Malmö Högskola - Fakulteten för teknik och samhälle.
- IEG (2008a). *Tillämpningsdokument, EN 1997-1 Kapitel 11 och 12, Slänter och bankar*. SGF Svenska Geotekniska Föreningen.
- (2008b). *Tillämpningsdokument, Grunderna i Eurokod 7*. [Reviderad 2013-12-15]. SGF Svenska Geotekniska Föreningen.
- Jakobsson, Erik och Romero, Pablo (2010). *Spontberäkning Norra Länken NL51 - Jämförelsestudie av beräkningsmetoder för jordtryck mot sponter*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Kianfar, Ehsan och Toufigh, Vahab (2016). "Reliability analysis of rammed earth structures". I: *Construction and Building Materials* 127, s. 884–895.
- LECA (UÅ). *Vad Leca är*. URL : <https://www.leca.se/index.php/om-leca/vad-ar-leca/>. [Hämtad 2020-04-07].
- Lindberg, Marianne (2018). "Skogen får ny användning i asfaltsindustrin". I: *ATL - Lantbrukets Affärstidning*.
- Lundström, Karin, Odén, Karin och Rankka, Wilhelm (2015). *Schakta säkert - säkerhet vid schaktning i jord*. AB Svensk Byggtjänst.
- Makusa, Gregory Paul (2012). *Soil stabilization methods and materials*. [Hämtad 2020-01-30]. Luleå University of Technology.
- Mellgren, Erik (2007). "Lignin i leran ger bättre vägar". I: *NyTeknik*.

- Miljösamverkan Västra Götaland, Miljösamverkan Värmland (2010). *Hantering av schaktmassor - Tillsynshandledning*. Miljösamverkan Västra Götaland och Miljösamverkan Värmland.
- Muntohar, Agus Setyo (2011). "Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick". I: *Construction and Building Materials* 25, s. 4215–4220.
- Nagaraj, H.B., Rajesh, A. och Sravan, M.V (2016). "Influence of soil gradation, proportion and combination of admixtures on the properties and durability of CSEBs". I: *Construction and Building Materials* 110, s. 135–144.
- National Engineering Handbook (2007). *Design and Use of Sheet Pile Walls in Stream Restoration and Stabilization Projects*. URL:<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17828.wbaf>. [Hämtad 2020-02-03].
- Nationalencyklopedin (2020). *Lignin*. URL:<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/lignin>. [Hämtad 2020-02-06].
- Naturvårdsverket (2009). *Riktvärden för förorenad mark - Modellbeskrivning och vägledning*.
- (2017). *Koldioxidekvivalenter*. URL:<https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-0/Vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-fran-exporterande-foretag/Koldioxidekvivalenter/>. [Hämtad 2020-02-13].
- Peab (UÅ). *E45 Lilla Bommen - Marieholm*. URL:<https://peab.se/projekt/infrastruktur/e45-lilla-bommen--marieholm/>. [Hämtad 2020-02-20].
- Peab Anläggning Halland (2019). "E45 Lilla Bommen - Marieholm (EF) "Sänkningen"".
- Rempel, A.W. och Rempel, A.R. (2019). "Frost resilience of stabilized earth building materials". I: *Geosciences (Switzerland)*.
- Riza, Fetra Venny, Rahman, Ismail Abdul och Zaidi, Ahmad Mujahid Ahmad (2010). *A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick*. URL:<https://core.ac.uk/download/pdf/12006755.pdf>. [Hämtad 2020-01-30].
- Runol, Martin (2011). "Schaktmassor blir långa bullervallar". I: *Sydsvenskan*.
- Seequent (UÅ). *Geoslope*.
- Statens geotekniska institut (2018). *Skredrisk Göta älv*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/samhallsplanering--sakerhet/skredriskutredningar/gota-alkv/>. [Hämtad 2020-01-27].
- (2019a). *Grundläggning och förstärkning*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/>. [Hämtad 2020-01-21].
- (2019b). *Hållbar materialanvändning*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/hallbar-materialanvandning/>. [Hämtad 2020-01-22].
- (2019c). *Jordarter*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/lera-och-kvicklara/>. [Hämtad 2020-01-27].
- (2019d). *Jords tekniska egenskaper*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/jords-tekniska-egenskaper/>. [Hämtad 2020-01-27].
- (2019e). *Schaktmassor i stora infrastrukturprojekt*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/effektivare-markbyggande/materialguiden/atervinning-av-schaktmassor/atervinning-av-schaktmassor-i-stora-infrastrukturprojekt/>. [Hämtad 2020-04-06].

- Statens geotekniska institut (2019f). *Schaktmassor som är avfall*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/effektivare-markbyggande/materialguiden/atervinning-av-schaktmassor/schaktmassor-som-ar-avfall/>. [Hämtad 2020-03-25].
- (2019g). *Stödkonstruktioner*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/stodkonstruktioner/>. [Hämtad 2020-01-21].
 - (2019h). *Återvinning av schaktmassor*. URL:<https://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/effektivare-markbyggande/materialguiden/atervinning-av-schaktmassor/>. [Hämtad 2020-03-25].
- Stripple, Håkan, Sternhufvud, Catarina och Skårman, Tina (2015). *Utredning om möjligheterna att minska utsläppen av fossil koldioxid från mineralindustrin*. IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Svensk Betong (UÅ). *Koldioxidutsläpp*. URL:<https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/miljo-och-hallbarhet/koldioxidutslapp/>. [Hämtad 2020-05-05].
- Svensk Byggtjänst (2017). *AMA Anläggning 17. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten*. Svensk Byggtjänst.
- Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (UÅ). *Omgivningspåverkan vid installation av slitsmurar*. URL:<https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/56f11033-50cc-4b3a-a09b-3be8a61ef3a2/SBUF-1006.pdf>. [Hämtad 2020-01-22].
- Svenska Geotekniska Föreningen (2003). *Jordförstärkningsmetoder, metodblad*. URL:<http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=3362>. [Hämtad 2020-02-09].
- Svensson, Per Lennart (1990). *Jordförstärkningsteknik*. Byggforskningsrådet — Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- Sveriges lantbruksuniversitet (2019). *Vad är en livscykelanalys*. URL:<https://www.slu.se/institutioner/energi-teknik/forskning/lca/vadar/>. [Hämtad 2020-02-05].
- Talme A., Oskar (1968). *Clay Sensitivity and Chemical Stabilization*. Department of Quaternary Research, University of Stockholm — The National Swedish Institute for Building Research — Byggeforskningens rapport 56:1968.
- Tibnor (2018). *Konstruktionstabeller 2018*. URL:https://abrahamssonsjarn.se/app/uploads/2019/09/Tibnor_Konstruktionstabeller-2018.pdf.
- Trafikverket (2011). *TK Geo 11- Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner*. URL:https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10749/RelatedFiles/2011_047_tk_geo_11_2.pdf.
- (2015). *Lagar, regler och förordningar om upphandling*. URL:<https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/upphandling/Sa-upphandlar-vi/Lagar-regler-och-forordningar/>. [Hämtad 2020-04-07].
 - (2018a). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. [Modellversion 6.1].
 - (2018b). *Klimatkalkyl - Infrastrukturens klimatpåverkan och energianvändning i ett livscykelperspektiv*. Trafikverket.
 - (2019a). *E45, Lilla Bommen-Marieholm*. URL:<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/E45-Lilla-Bommen-Marieholm/>. [Hämtad 2020-02-20].

- (2019b). *Sekantpålning på Korsvägen*. URL:<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/Vastlanken---smidigare-pendling-och-effektivare-trafik/aktuellt-i-ditt-omrade/deletapp-korsvagen/nyheter-i-ditt-omrade/2019-08/sekantpålning/>. [Hämtad 2020-01-22].
 - (2019c). *Slitsmurar bildar en del av Västlänkens tunnelväggar*. URL:<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/Vastlanken---smidigare-pendling-och-effektivare-trafik/Om-Vastlanken/sa-bygger-vi-vastlanken/att-bygga-i-lera/slitsmurar-bildar-en-del-av-vastlankens-tunnelväggar/>. [Hämtad 2020-01-23].
 - (2019d). *Trafikverkets klimatarbete*. URL:<https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/energi-och-klimat/klimatkrav/>. [Hämtad 2020-03-25].
 - (2020a). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>.
 - (2020b). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. [Modellversion 6.1].
 - (2020c). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. [Modellversion 6.1].
 - (2020d). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. [Modellversion 6.1].
 - (2020e). *Klimatkalkyl*. URL:<http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. [Modellversion 6.1].
- Tudisco, Erika och Dahlblom, Ola (2017). *Course literature in Foundation Engineering, VGTN01*. LTH, Lund University.
- Upphandlingsmyndigheten (2017). *Känslighetsanalys*. URL:<https://www.upphandlingsmyndigheten.se/omraden/lcc/perspektiv/kanslighetsanalys/>. [Hämtad 2020-03-03].
- (2019). *Grund för utvärdering*. URL:<https://www.upphandlingsmyndigheten.se/upphandla/Processen-for-LOU/upphandlingen/Utforma-upphandlingsdokument/anbudsutvardering/>. [Hämtad 2020-04-08].
- Zukri, Azhani, Nazir, Ramli, Said, Khairun Nissa Mat och Moayed, Hossein (2018). *Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA)*. MATEC Web of Conferences.
- Åhnberg, Helen (2019). *Sekantpålar som stödkonstruktion - Litteraturstudie*. URL:<http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v544.pdf>.

Bilaga A

Spontdimensionering

Brottlastberäkning enligt EN 1997, SPHB 2018

Säkerhetsklass: 2 $\gamma_{S;d,a,Frik}$: 1,10 $\gamma_{R;d,p,Frik}$: 1,10 Ncb: 5,7
 γ_{d} : 0,91 $\gamma_{S;d,a,Lera}$: 1,10 $\gamma_{R;d,p,Lera}$: 1,10
 $\gamma_{S;d}$: 1,274 (vekt konstruktionselement)

Jordartstabell

Jord nr	Jordartstyp	Geokonstruktionens Hållfasthetsvärden				Densiteter kN/m ³		Partialkoefficient η -värde	
		Pop-Medelv.	ökning /m	Dimensio-nerande	ökning /m	Torr	Vatten-mättad		
1	Lera	25 kPa	0,00	16,7 kPa	0,00	17,5	17,5	1,5	1,00
2	Lera	14 kPa	1,38	9,3 kPa	0,92	16,5	16,5	1,5	1,00
3	Lera	22 kPa	1,38	14,7 kPa	0,92	16	16	1,5	1,00

Jordtrycksberäkning

Aktivt tryck

Nivå	Jord						Lokala Överlast	
	σ_v	ϕ_d	C_{ud}	Ka	U_w	σ_a	σ_h	σ_{htot}
+0,0	0,0		16,7			-36,8		
- 1,0	17,5		16,7			-17,5	8,0	8,0
- 1,0	17,5		9,3			-1,2	8,0	8,0
- 4,0	67,0		12,1			47,2	10,8	10,8
- 7,0	116,5		14,8			95,6	3,2	3,2
- 7,0	116,5		14,7			95,9	3,2	3,2
- 8,1	134,1		15,7			113,1	2,3	2,3
- 17,3	281,3		24,2			256,5		

Passivt tryck

Nivå	σ_v	ϕ_d	C_{ud}	Kp	U_w	σ_p
- 4,0	0,0		12,1			26,5
- 7,0	49,5		14,8			87,1
- 7,0	49,5		14,7			86,8
- 8,1	67,1		15,7			108,4
- 17,3	214,3		24,2			288,9

Dimensionerande jordtryck

Nivå	$\sigma_a - \sigma_p$	σ_{netto}	Lokala överlast	Dim jordtryck inkl överlast
+0,0	-36,8		0,0	0,0
- 1,0	-17,5		8,0	10,0
- 1,0	-1,2		8,0	10,0
- 4,0	47,2		10,8	58,0
- 4,0		-2,2	10,8	8,6
- 7,0		-19,2	3,2	-16,0
- 7,0		-18,5	3,2	-15,3
- 8,1		-24,8	2,3	-22,5
- 17,3		-77,9	0,0	-77,9
- 17,3	-32,4		0,0	-77,9

Överlast

Last 1 : $q_d=16,6$ kPa Enligt: SBN 80, se sponthanboken sid 162

$q_k=13,0$ kPa, variabel last

angreppsnivå : +0,0

avstånd till sponten : 1,5 m

angreppslängd vinkelrätt mot sponten : 2,0 m

Last 2 : $q_d=16,6$ kPa Enligt: SBN 80, se sponthanboken sid 162

$q_k=13,0$ kPa, variabel last

angreppsnivå : +0,0

avstånd till sponten : 3,5 m

angreppslängd vinkelrätt mot sponten : 2,0 m

Total horisontell effekt _____

Beräkningsförutsättningar

Sponten har dimensionerats utan omfördelning av jordtrycket

Sponten har förutsatts slagen så att grundvattnet inte läcker mellan aktiv och passivsida

Beräkningsresultat brottgränsberäkning

Erforderlig spont uk: -8,1

Pådrivande jordtryck: 113,9 kN/m

Pådrivande jordtryckets moment runt hammarbandet: 207,1 kNm/m

Mothållande jordtryck: 36,2 kN/m

Mothållande jordtryckets moment runt hammarbandet: 219,4 kNm/m

Mothållande jordtryckets hävarm till hammarbandet: 6,1 m

Hammarbandsnivå: -1,0 m

Horisontell hammarbands last $q_{h,Ed}$: 79,7 kN/m

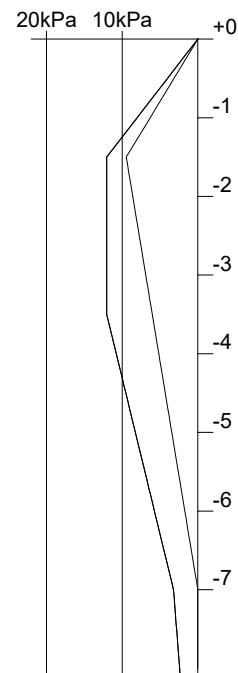
Dimensionerande moment se sid 55 i Sponthandboken 2018

$T=0$ på nivå +0,0

$h=-1,0$ m

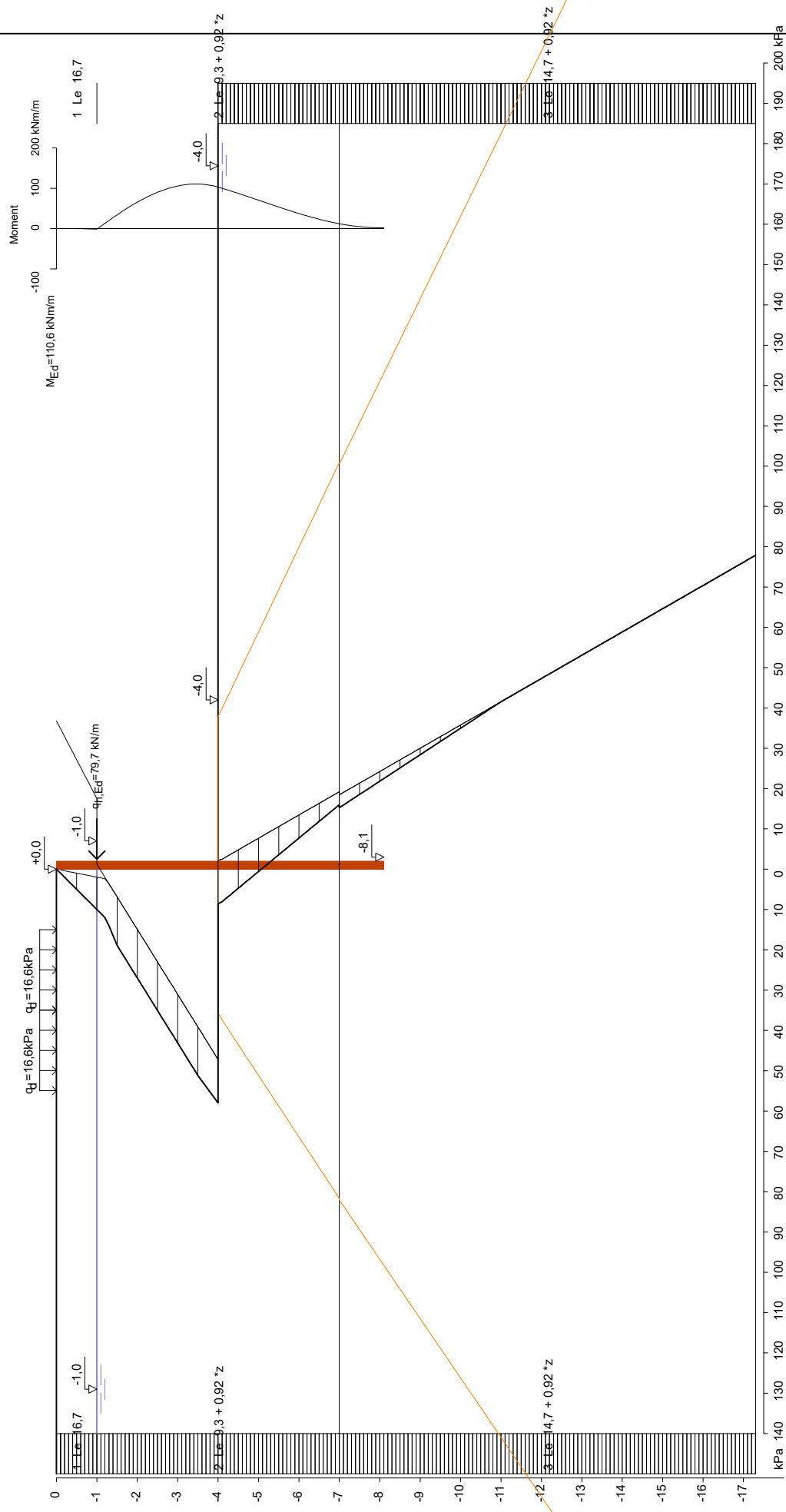
$hA=-2,39$ m

$M_{Ed}=79,73 \cdot (-1,0 - -2,39) = 110,6$ kNm/m



$\gamma_{S;d,a,Lera} = 1,10$ $\gamma_{R;d,p,Lera} = 1,10$

Brottgrensberäkning enligt EN-1997, SPHB 2018 i Säkerhetsklass: 2 $\gamma_{S;d,a,Frik} = 1,10$ $\gamma_{R;d,p,Frik} = 1,10$



Uppdragsnr

Exjobb exempelsektion 1

Sektion

Sek A

Sid nr

Spontprogrammet Ver: 2.99

Datum: 2020-02-25 10:35:43

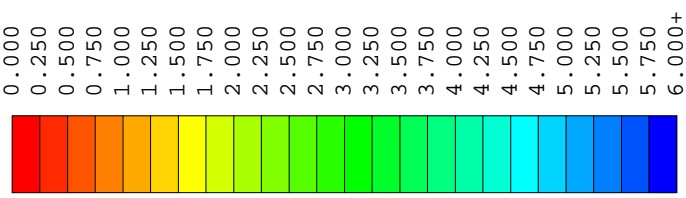
Konstruktör: Anton K

Peab Anläggning AB - Grundteknik

Bilaga B

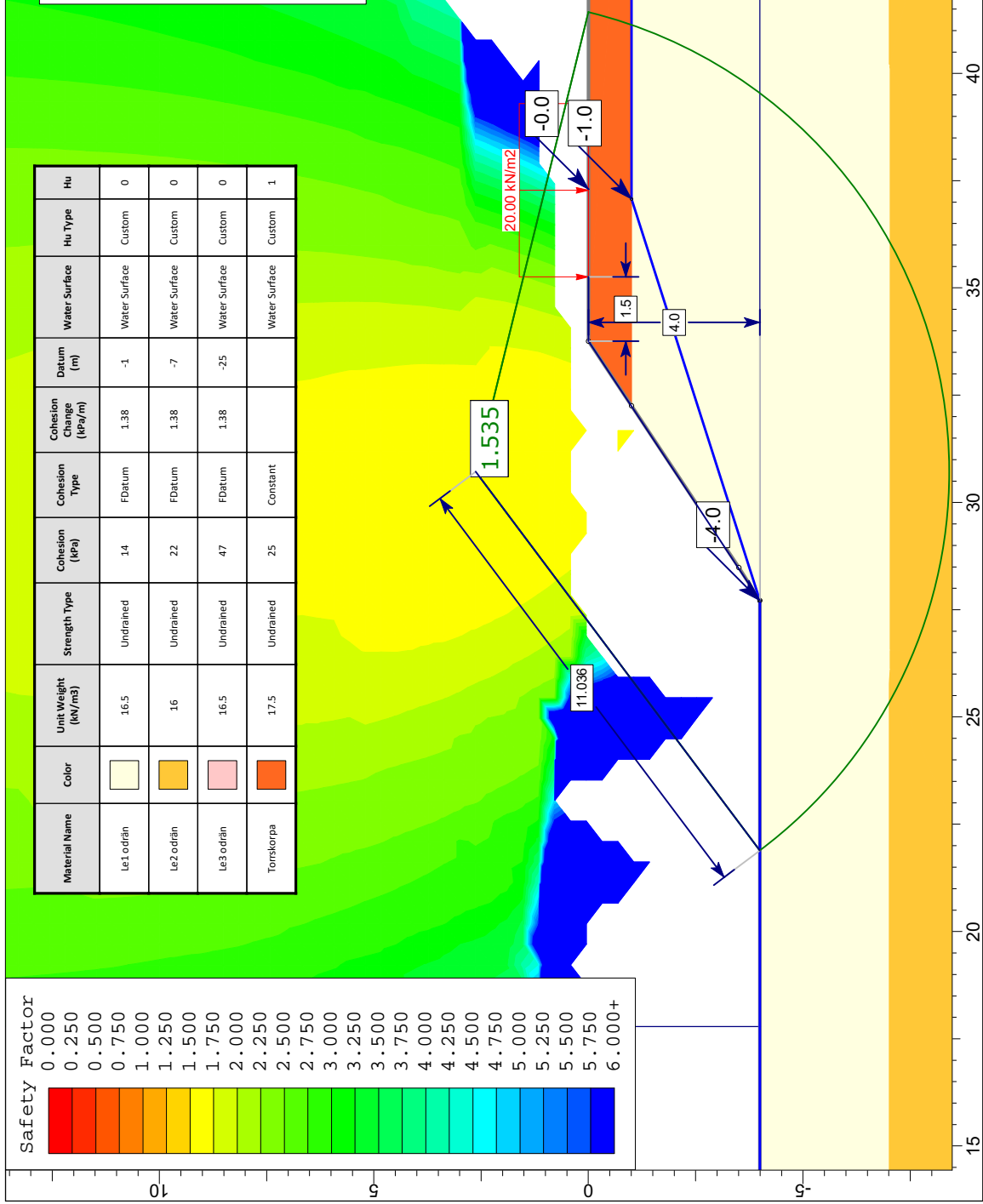
Släntanalys

Safety Factor



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu
le1 odian		16.5	Undrained	14	Fdatum	1.38	-1	Water Surface	Custom	0
le2 odian		16	Undrained	22	Fdatum	1.38	-7	Water Surface	Custom	0
le3 odian		16.5	Undrained	47	Fdatum	1.38	-25	Water Surface	Custom	0
Tonskorpa		17.5	Undrained	25	Constant			Water Surface	Custom	1

Global Minimums
 Method: gle/morgenstern-price
 FS: 1.535480
 Center: 30.714, 2.623
 Radius: 11.036
 Left Slip Surface Endpoint: 21.886, -4.000
 Right Slip Surface Endpoint: 41.433, -0.005
 Resisting Moment=5725.49 kN-m
 Driving Moment=3728.79 kN-m
 Resisting Horizontal Force=422.065 kN
 Driving Horizontal Force=274.875 kN
 Total Slice Area=93.7563 m²
 Surface Horizontal Width=19.5474 m
 Surface Average Height=4.79636 m



Projekt

NORDENS SAMHÄLLSBYGGARE

E45 Lilla Bommen - Marielholm

Beräkningsbeskrivning

Odränerad

Utför av

AG

Skala 1:150

Exempelgeometri 1

Date

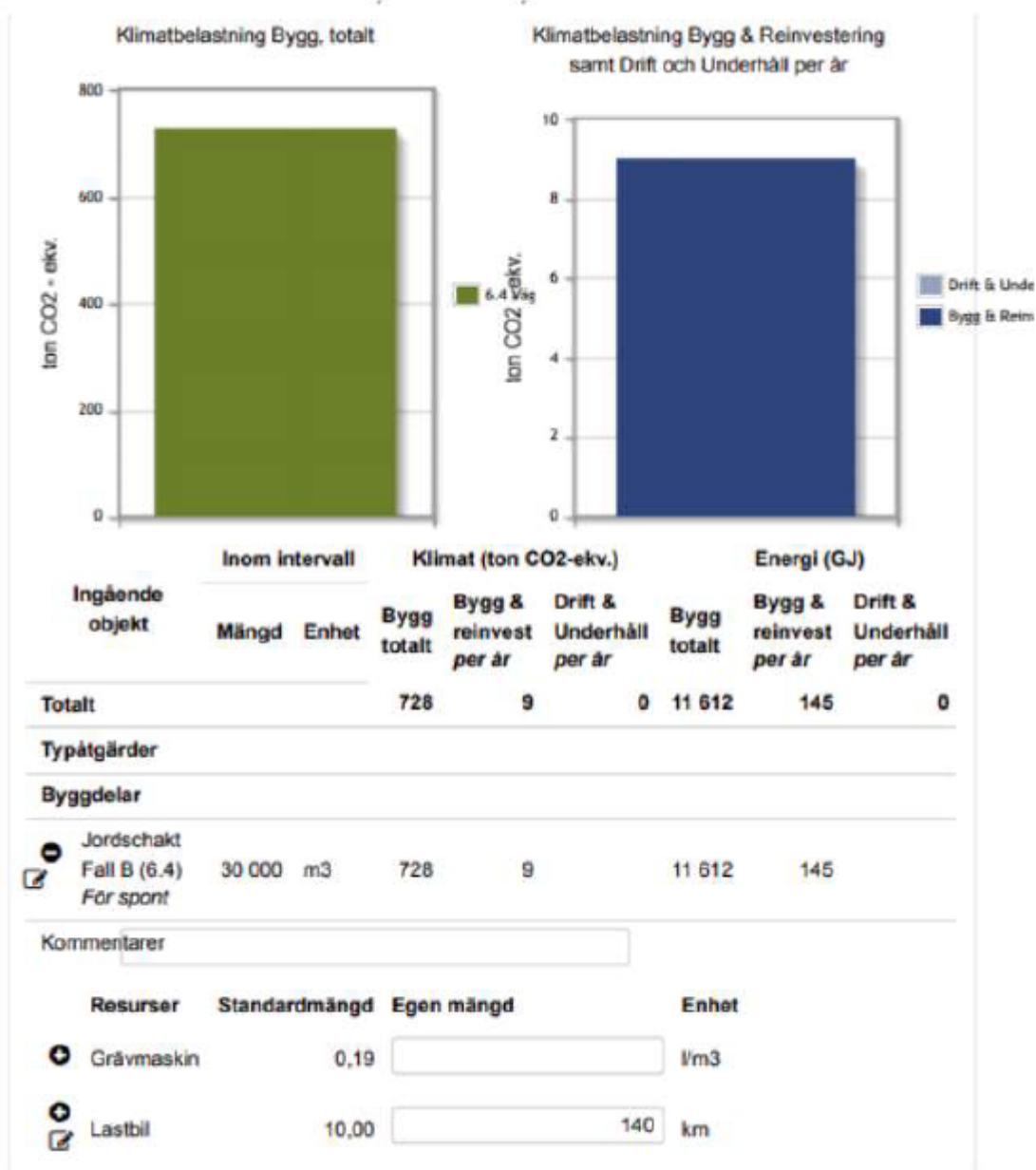
2020-02-25

File Name

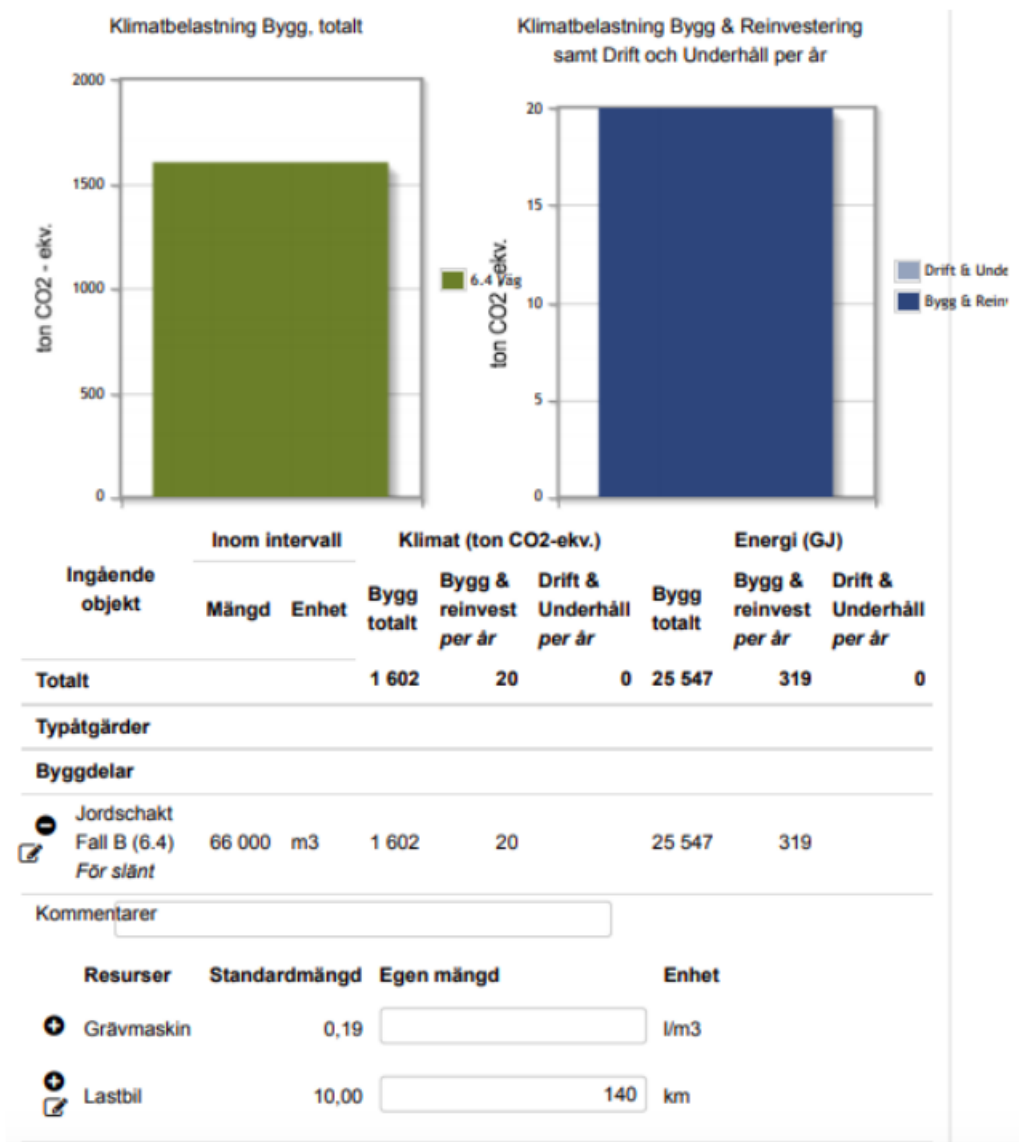
Exjobb Maria och Josefin.slm.d

Bilaga C

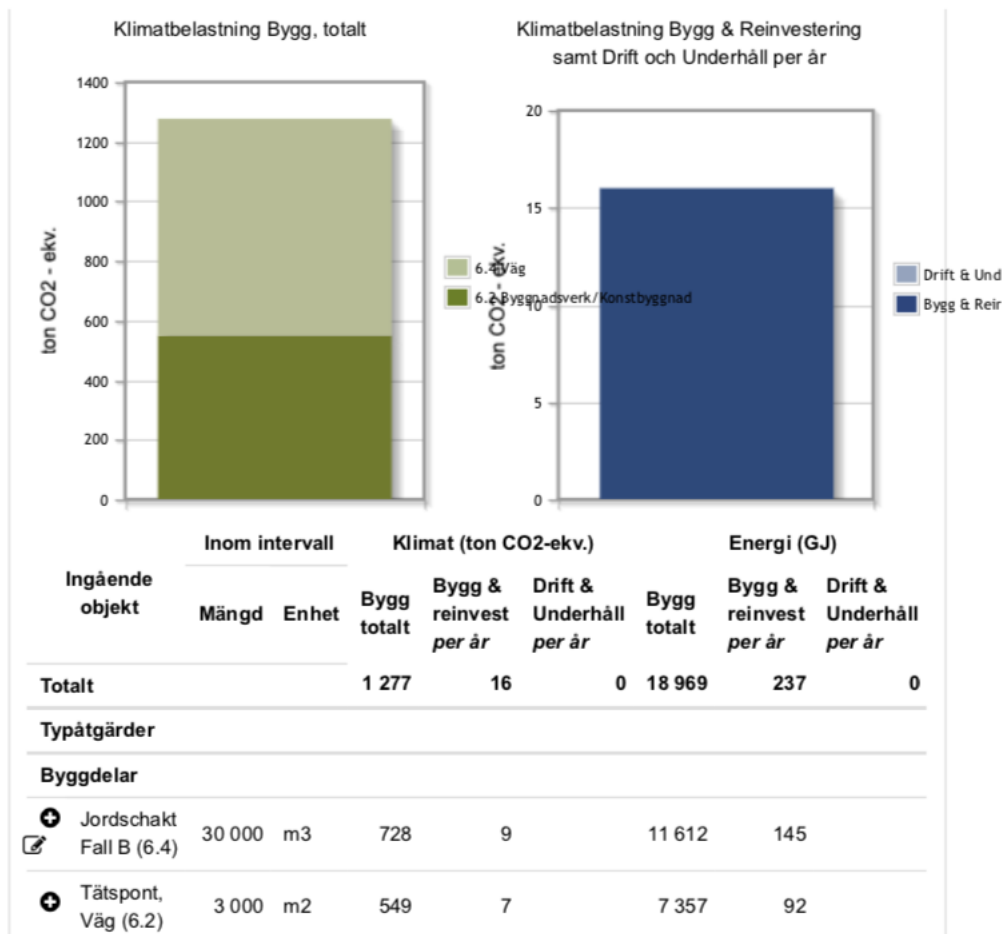
Trafikverkets Klimatkalkyl



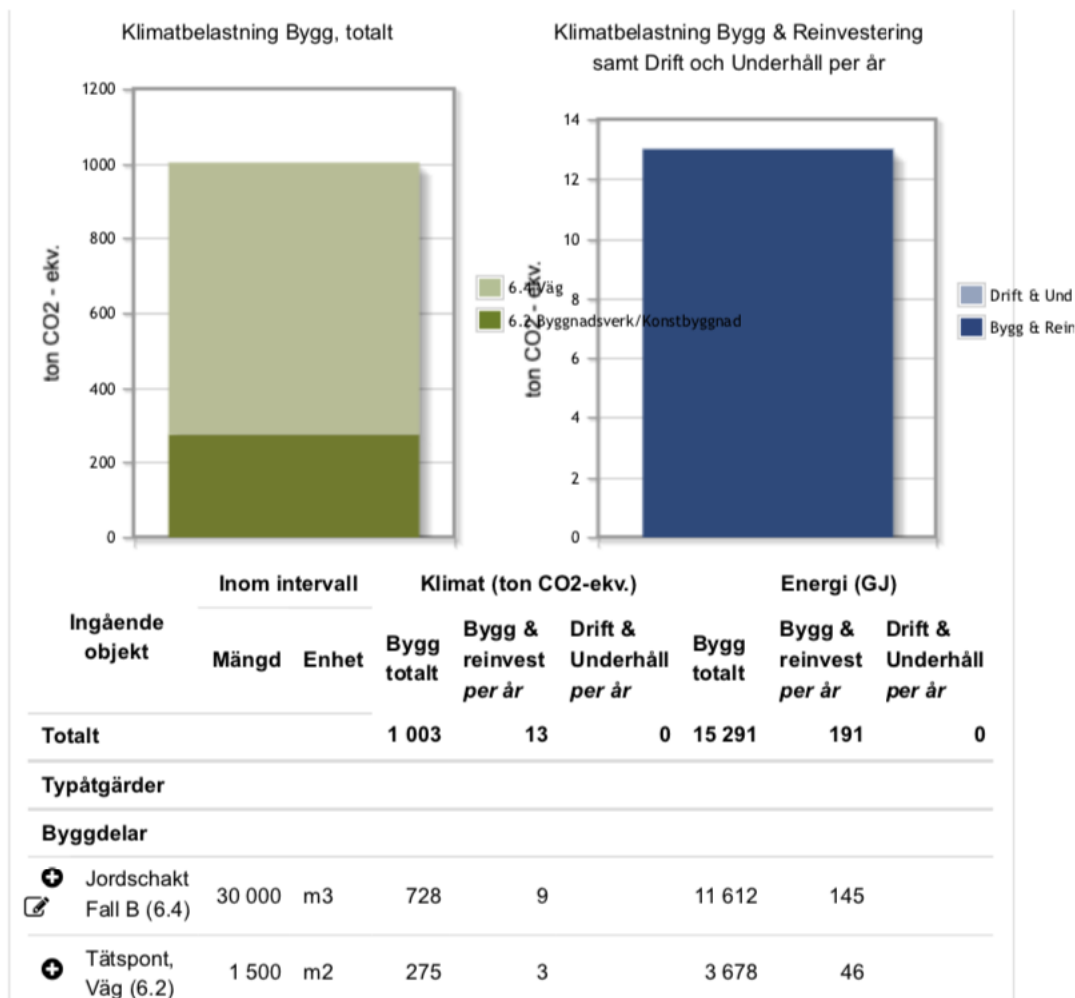
Figur C.1: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med spont (Trafikverket, 2020b)



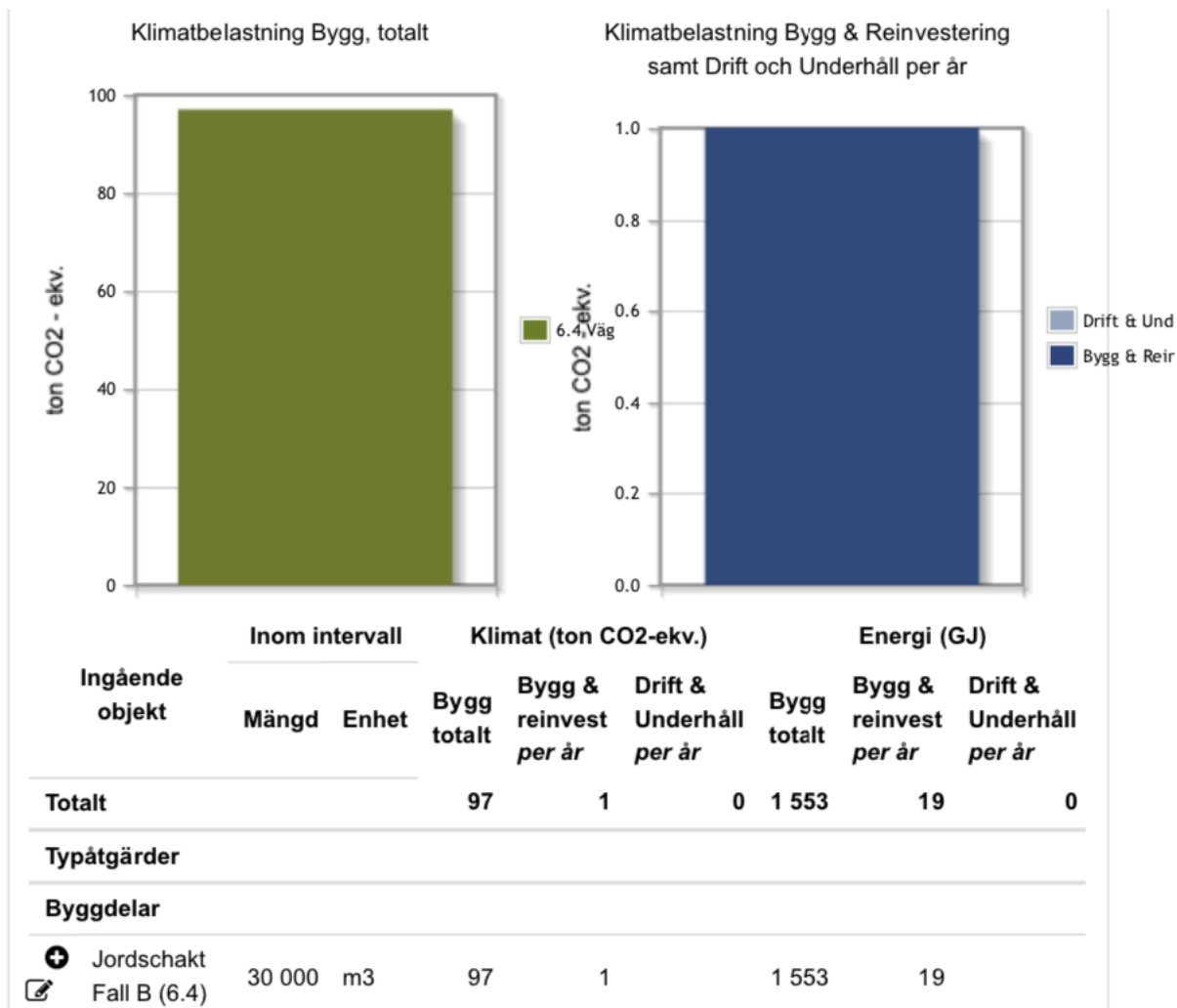
Figur C.2: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med släntning (Trafikverket, 2020c)



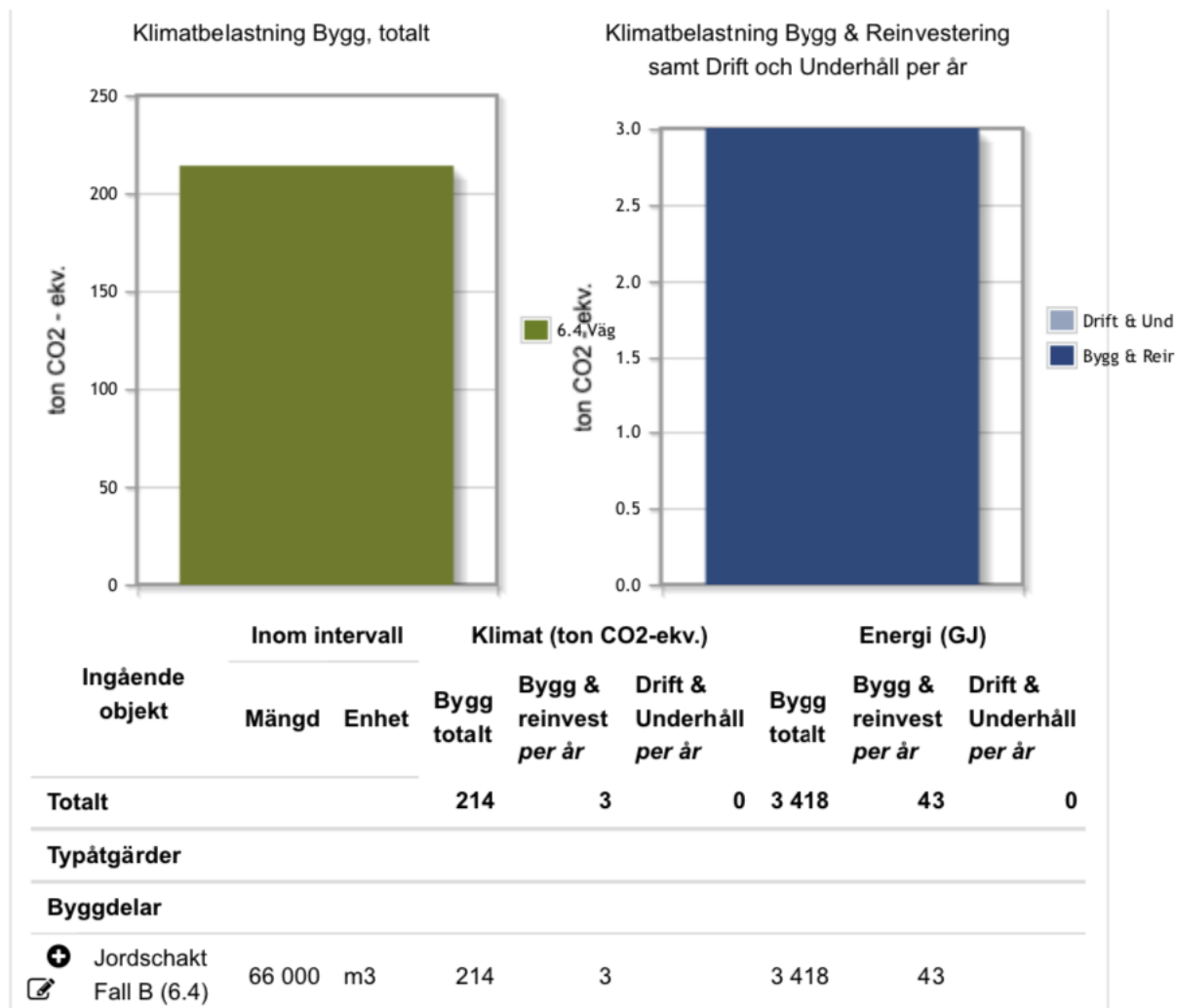
Figur C.3: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med ej återanvänd spont (Trafikverket, 2020d)



Figur C.4: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med hälften återanvänd spont (Trafikverket, 2020e)



Figur C.5: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med spont med deponiavstånd 8 km enkel resa (Trafikverket, 2020e)



Figur C.6: Resultat utsläpp CO₂e för alternativ med släntning med deponiavstånd 8 km enkel resa (Trafikverket, 2020e)