



CHALMERS



Styrd borrhning

En beräkningsstudie om borrhvåtsketryck i lera

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Byggingenjör

JOACIM EDWIJN

JONAS BOND

EXAMENSARBETE 2015:21

Styrd borrning

En beräkningsstudie om borrhätsketryck i lera

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JOACIM EDWIJN

JONAS BOND

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2015

Styrd borrhning
En beräkningsstudie om borrhvåtsketryck i lera
Examensarbete i högskoleingenjörprogrammet
Byggingenjör
JOACIM EDWIJN
JONAS BOND

© JOACIM EDWIJN/JONAS BOND, 2015

Examensarbete 2015:21 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2015

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Bild på D60 från hemdraget av fjärrkyla i Mölndalcentrum. (Foto: Joacim Edwijn)

Chalmers Reproservice/Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2015

Styrd borring

En beräkningsstudie om borrhätsketryck i lera

Examensarbete i högskoleingenjörprogrammet

Byggingenjör

JOACIM EDWIJN

JONAS BOND

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

För höga borrhätsketryck är ett stort problem för styrd borring. Blowouts och markhävning är två problem som kan uppstå när styrd borring utförs och blir oftast väldigt kostsamma. Under styrd borring har man även dålig koll på hur dragkraftsfördelningen ser ut på mediaröret under hemdraget. Syftet med examensarbetet är att få en bättre arbetsmetodik för styrd borring, kunna förutse dessa problem på förhand och för att kunna göra rätt åtgärder innan det är försent.

En litteraturstudie om hur styrd borring fungerar ligger tillgrund för hur hela arbetsmetodiken fungerar och resultatet är baserat på 5 olika borrhningar i Göteborg och Mölndal i liknande geoteknisk miljö. Under borrhningarna har det använts ett mätverktyg som heter TensiTrak.

Resultatet konstaterar att dragkraftsfördelningen på mediarören inte är något större problem därför att rymmaren tar upp större delen av kraften från borrhmaskinen. Borrhätsketrycket ligger däremot ofta för högt och i riskzonen för blowout eller markhävning, speciellt så fort bakflödet förloras. Resultatet visar även, för att kunna ha ett bestående borrhål under hemdraget, att det är viktigt att det blandas rätt och inte genomförs hemdrag med bara vatten samt förslagsvis att en mellanrymning av hålet genomförs innan påbörjat hemdrag. Leran är väldigt förlåtande vad det gäller att inte blanda rätt eller mellanrymma men då resulterar det oftast i för höga borrhätsketryck och konsekvenserna av detta kan bli att det uppstår t.ex. framtida sättningar.

Ett beräkningsverktyg har även skapats i Excel för att kunna göra utvärderingar vid olika scenarion för styrd borring. Det har skapats med hjälp av empiriska värden, klassisk jordmekanik och sonderingar i Göteborgsområdet.

Nyckelord: Styrd borring, borrhätsketryck, blowout, dragkraft

Horizontal directional drilling

A computational study of the drilling fluid pressure in clay

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

JOACIM EDWIJN

JONAS BOND

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of GeoEngineering

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Drilling fluid pressure that exceeds its limitations is a major problem for horizontal directional drilling. Blowouts and soil upheaval are two problems that can occur when drilling and it is usually very expensive. During pullback it's difficult to keep track of how the traction distribution is divided around the pipe. The purpose of the study is to increase the methodology for drilling and anticipate these problems in advance and make the right adjustments before it is too late.

A literature study of how horizontal directional drilling works is the foundation of this thesis and the result is based on 5 different drillings in Gothenburg and Mölndal in similar geotechnics. It has been carried out with a measuring tool called TensiTrak.

The result shows that the traction distribution is not a major problem because the reamer absorbs larger part of the force. The drilling fluid pressure, however, is often too high and the risk of blowout or soil upheaval is increasing due to loss of backflow. The result shows in order to have a lasting borehole during pullback it is important to mix right and pre-ream the hole. The clay is very forgiving when it comes to not mixing properly or pre-reaming, but the drilling fluid pressure often gets too high and you don't know what the consequences of this is e.g. settlings.

A computational tool has also been created in Excel to make evaluations at different scenarios for horizontal directional drilling. It has been developed using empirical values, classical soil mechanics and soundings in the Gothenburg region.

Key words: Horizontal directional drilling, drilling fluid pressure, blowout, traction distribution

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Metod	2
2 STYRD BORRNING	3
2.1 Arbetsmetodik	3
2.2 Arbetsredskap	4
2.3 Borrvätska	4
2.4 F5 TensiTrak-system	5
2.4.1 F5 TensiTrak Transmitter	5
2.4.2 F5 Receiver	6
3 TEORI	7
3.1 Geoteknik	7
3.1.1 Jordens uppbyggnad	7
3.1.2 Spänningar i jord	8
3.2 Vätsketryck	9
3.3 Queen´s solution	10
4 FÄLTSTUDIE	11
5 RESULTAT	12
5.1 Hemdrag	12
5.1.1 Hemdrag Ullevi, 560rör	13
5.1.2 Hemdrag Fabriksgatan, 400rör	14
5.1.3 Hemdrag 2 Fabriksgatan, 400rör	15
5.1.4 Hemdrag Sofierogatan, 2x400rör	16
5.1.5 Hemdrag Mölndal, 355, 120rör	17
5.2 Dragastighet	18
CHALMERS , <i>Bygg- och miljöteknik</i> , Examensarbete 2015:21	III

5.3	Dragkraft	18
5.4	Teoretiskt bakflöde	19
5.5	Beräkningsverktyg för att utvärdera borrhätsketryck vid förlorat bakflöde	20
5.5.1	Antaganden	20
5.5.2	Guide	21
5.5.3	Användningsområden	23
6	ANALYS OCH DISKUSSION	24
6.1	Borrhätsketryck	24
6.2	Draghastighet	25
6.3	Dragkraft	26
6.4	Teoretiskt bakflöde	26
6.5	TensiTrak felmarginal	26
7	SLUTSATSER	27
8	REFERENSER	28

Förord

Det här examensarbetet har genomfört tillsammans med Styrud Ingenjörfirma AB och avdelningen för geologi och geoteknik på Chalmers Tekniska Högskola under våren 2015. Examensarbetet är en del av byggingenjörsutbildningen och omfattar 15 högskolepoäng.

Vi vill rikta sett stort tack till Styrud och vår handledare Tobias Wingqvist, som har låtit oss göra detta arbete hos dem. Stort tack till alla yrkesarbetare som har varit väldigt tillmötesgående under tiden vi har varit i fält. Vi vill även tacka vår handledare på Chalmers Tekniska Högskola, Mats Karlsson som har fått oss på rätt väg och tänka utanför lådan.

Göteborg juni 2015

Joacim Edwijn och Jonas Bond

Beteckningar

C_u	Odränerad skjuvhållfasthet
D	Rördiameter
G	Skjuvmodul
$G_0 (NC)$	Skjuvmodul vid normalkonsoliderad lera
K_0	Jordtryckskoefficienten
R_0	Borrhålets radie
R_p	Maximal plastisk radie
Re	Reynoldstal
P_0	Effektivspänning
U	Medelhastigheten
W_L	Flytgräns
z_i	Tjocklek för aktuellt jordlager
γ	Skjuvdeformation
γ_i	Jordens tunghet
φ	Inre friktionsvinkel
σ	Spänning
σ_0	Total markspänning
σ'_0	Effektivspänning
τ	Skjuvspänningar
τ_f	Mohr-Coulomb's brottskriterium
ρ_i	Skrymdensitet
ρ	Densitet
ν	Kinematisk viskositet
c	Jordens kohesion
g	Tyngdaccelerationen
h	Aktuellt djup
p	Hydrostatiskt tryck
u	Porvattentryck
Bakflöde	Borrvätskan som rinner längst med röret
Bar	~100kPa
Bentonit	Geologiskt lermaterial
Blowout	Bentonituppträngning genom marken
Borrvätsketryck	Aktuellt tryck i borrhålet
Filterkaka	Skyddande hinna som förhindrar borrhålet från att kollapsa
Hemdrag	Installation av rör
Hydrolock	Dragkraften från maskinen motsvarar bakåtsträvande tryck i borrhålet
Markhävning	Marken reser sig på grund av för högt borrvätsketryck
Mottagargrop	Gropen där bormaskinen står och röret kommer ut i
Rymmare	Förstörningsborr som används vid hemdrag
Slutgrop	Gropen där pilotborrning slutar och större delen av borrhåtska hamnar i
Svivel	Förhindrar att röret roterar runt sin egen axel
TensiTrak	Mätverktyg för tryck- och dragkrafter

Vermeer D100	Borrmaskin
Vermeer D60	Borrmaskin
Queen´s solution	Ekvation för att uppskatta maximalt tillåtet borrhvatsketryck

<i>Figur 1. Bild på hemdrag. Styrud.se.</i>	3
<i>Figur 2. Bild på styrsked.</i>	3
<i>Figur 3. Från vänster i bild, TensiTrak, svivel och rymmare.</i>	4
<i>Figur 4. Bild på rymmare.</i>	4
<i>Figur 5. Bild på TensiTrak under styrd borrning.</i>	5
<i>Figur 6. Bild på F5-mottagaren.</i>	6
<i>Figur 7. Diagram Hemdrag 1</i>	13
<i>Figur 8. Diagram Hemdrag 2</i>	14
<i>Figur 9. Diagram Hemdrag 3</i>	15
<i>Figur 10. Diagram Hemdrag Sofierogatan.</i>	16
<i>Figur 11. Diagram Hemdrag Mölndal.</i>	17
<i>Figur 12. Bild till Guide, Steg 1.</i>	21
<i>Figur 13. Bild till Guide, Steg 2.</i>	21
<i>Figur 14. Bild till Guide, Steg 3.</i>	22
<i>Figur 15. Bild till Guide, Steg 4.</i>	22
<i>Figur 16. Knäckpunkt bakflöde.</i>	25

1 Inledning

Styrd borring är ett schaktfritt ledningsbyggande för installation av olika typer av rör. I detta kapitel kommer bakgrund om de problem som kan uppstå under installation att presenteras, syftet med detta examensarbete, avgränsningar, mål och tillslut metoden hur det skall genomföras.

1.1 Bakgrund

Vid styrd borring används borrvätsketrycket för att lossöra och transportera bort jordmaterial och därmed skapa utrymme att installera röret. Borrvätskan har också uppgiften att upprätthålla ett borrhål i marken under installationen. Om borrhålet kollapsar försämras möjligheten att transportera ut jordmassor. När bakflödet avstannar eller upphör måste röret dras in på kraft i marken med följd att jordmaterial och borrvätska pressas ut i omgivande mark vilket leder till;

- I bästa fall ingenting. I okonsoliderade leror finns viss möjlighet till kompression och omgivande jordmaterial kan då pressas samman och ”svälja” rör och tillsatt borrvätska.
- Bentonituppretryckning (s.k. blowout)- borrvätskan med tillhörande uppblandat jordmaterial hittar en annan väg ut, vanligen uppåt.
- Markhävning – omgivande jord kan inte pressas samman med följd att markytan höjer sig.
- Röret kollapsar (blir platt eller bucklas) pga. för stort borrvätsketryck.
- Hydrolock – om bakflödet stoppar kan ett hydrauliskt mottryck byggas upp som verkar motsatt riktning draget. Ju mer du pumpar desto mer motstånd. Tillslut leder detta till att ledningen fastnar.
- Röret fastnar, pga. Hydrolock eller för att friktionen mellan utsida rör och jordmaterial blir för stor.

Styrd borring används för att installera alla sorters rör så som vatten, avlopp, gas, fjärrvärme och fjärrkyla. Ibland förläggs skyddsrör medan ibland installeras mediasören direkt i marken. Rören som installeras är vanligen stumsvetsade PE-rör. Rören kan belastat olika beroende på dimension, godstjocklek och materialkvalitet. För skyddsrör finns normalt inga regelverk, har rören installerats och är hela kan det brukas. För mediasör finns dock krav på att ledningarna inte överdras under installation. Vid indragning av rören kan dragkraften på rymmaren avläsas i maskinen, men hur dragkraften fördelas mellan rymmaren och röret är okänt. Det är dragkraften på själva röret som är begränsad inte på rymmaren.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka och samla in kunskap kring borrvätsketryck och dragkraftspåkänningar på rör vid styrd borring. Den insamlade informationen skall användas för att hitta en arbetsmetodik till Styrd för att kunna genomföra säkrare borringar med bättre bakflöde och säkra dragkrafter på rör vid installation.

1.3 Mål

Målet med examensarbetet är att med hjälp av fält- och litteraturstudier arbeta fram en teoretisk modell och ett beräkningshjälpmedel som kan användas vid styrd borring. Där modellen och hjälpmedlet skall kunna användas för att:

- Förutse eller förvarna för kommande blowout.
- Få en snabbare indikation att bakflödet förändras.
- Förutse och därmed avhjälpa hydrolock.
- Bedöma dragkraften på rör för olika dimensioner.

1.4 Avgränsningar

Arbetet har genomförts i lera runt områden kring Göteborg och Mölndal, där eventuell jordskorpa inte tas med i beräkningarna och att lerans tunghet γ_i i områdena antas vara liknande överallt. Portrycksnivåerna har även de antagits att ligga på samma nivå genom hela områdena där arbetena har genomförts. Lerans flytgräns, W_L , har även den antagits vara konstant genom områdena. Avgränsningarna har gjorts med hänsyn att det är väldigt svårt att få fram exakta värden på längre sträckor och att de lokala variationerna som finns är väldigt svåra att ta med i beräkningarna. Ekonomiska aspekter har inte tagits hänsyn till under arbetet.

1.5 Metod

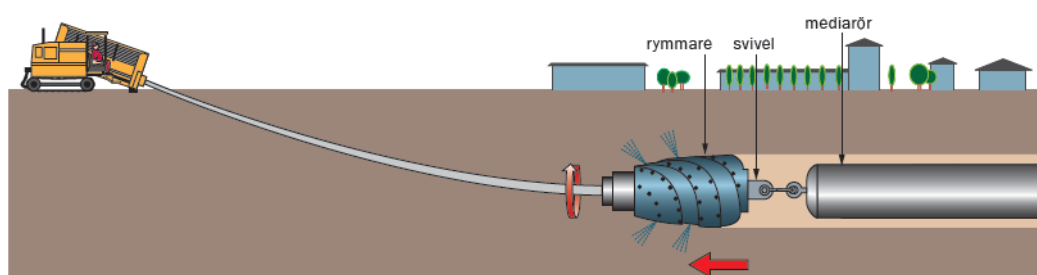
Informationen för detta arbete bygger främst på fältstudier gjorda hos Styrud Ingenjörfirman AB. Fältstudierna är gjorda i Göteborg och Mölndal under flertalet olika borringar där det har installerats fjärrkyla rör med metoden styrd borring. Där har yrkesarbetarna stått för mycket av informationen och tekniken kring hur styrd borring utförs.

Inför och under fältstudierna gjordes det en djupare litteraturstudie för att förstå hur marken reagerar när det tillsätts ett extra tryck under borring.

För att bearbeta resultatet har programmet Excel använts för att göra det möjligt att framställa en beräkningsmodell för att kunna uppskatta hur trycket ökar vid olika bakflöden.

2 Styrd borrhning

Styrd borrhning är en schaktfri metod för ledningsbyggande under t.ex. vägar, järnvägar eller vattendrag. Styrd borrhning innebär att borrhuvudet kan styras, samtidigt som det är en metod som kan ha mindre miljöpåverkan och som inte kräver stora etableringsytor. Styrd borrhningen är hydromekanisk och mekanisk vilket innebär att det inte bara borrar som vanligt, utan att tekniken använder sig av borrhväska, som kommer ur borrhuvudet med ett väldigt högt tryck som löser upp det okonsoliderade eller konsoliderade jordmaterialet. Det upplösta jordmaterialet följer sedan med ledningsröret via ett bakflöde som uppstår för att trycket är högre längst fram vid borrhuvudet. Bakflödet hjälper både till att frakta tillbaka materialet och att stabilisera borrhålet från att kollapsa, samtidigt som borrhuvudet hjälper till att mekaniskt lösgöra material (Bayer, 2005, s. 19-22).



Figur 1. Bild på hemdrag. Styrud.se.

2.1 Arbetsmetodik

I borrhuvudet sitter det en monterbar sändare som skapar ett elektromagnetiskt fält, som möjliggör att borrhuvudet kan spåras med en mottagare på markytan, så att borrhuvudet hela tiden kan hållas under uppsyn och ge aktuellt läge i marken.

Själva borrhuvudet har en asymmetrisk cylindrisk form med en sked längst fram som gör att borrhuvudet kan styras i olika riktningar (Bayer, 2005, s. 19-22).



Figur 2. Bild på styrsked.

När borrhningen börjar är första steget att genomföra en pilotborrning. Pilotborrningen slutar i en på förhand vald slutgrop som ledningen skall dras till. När pilotborrningen är klar och borrhuvudet har kommit fram till slutgropen byts borrhuvudet ut mot en rymmare som monteras ner mot hålet. Rymmaren fungerar som ett förstörningsborr för att göra borrhålet större, så att ledningen får plats i borrhålet. Ibland behövs det genomföras mellanrymning av hålet en eller flera gånger till önskad dimension, men ifall man redan direkt kan dra med sig röret, kopplas mediaröret till rymmaren med en svivel som förhindrar röret att rotera runt sin egen axel. Längst fram på mediaröret monteras ett draghuvud som sedan kan kopplas ihop med sviveln.

Rymmardiametern bör vara minst 30 % större än mediareötet för att få plats med tillräcklig mängd borrhväska, som består av en bentonitblandning, som hjälper till att smörja röret på hemdraget och att stabilisera borrhålet från att kollapsa (Bayer, 2005, s. 19-22).



Figur 3. Från vänster i bild, TensiTrak, svivel och rymmare.

2.2 Arbetsredskap

De olika arbetsredskap som Styrud använder för att kunna borra är borrhängar, borrhuvud med styrsked, rymmare, svivel och mixercontainer. Borrhängarna finns i flera olika längder och dimensioner, samtidigt som de är flexibla. Det finns flera olika typer av rymmare beroende på vilken geoteknisk miljö som det borraras i. De vanligaste för att borra i lera är beavertail, flycutter eller en egendesignad rymmare. Sviwelns uppgift är att förhindra rotation av mediareötet som installeras, men ibland är det bra att ha två svivlar ifall en av dem skulle skära. Mixercontainers uppgift är att blanda bentoniten till önskad blandning, för att sedan pumpa ut det till bormaskinen.



Figur 4. Bild på rymmare.

2.3 Borrhväska

När det borraras pumpas maskinen in borrhväska i hålet via stängerna. Borrhväskan består av en blandning av vatten, bentonit och tillsatser. Bentoniten höjer viskositeten, bärigheten och stabiliserar borrhålet från att kollapsa. Det hjälper även till att smörja och kyla ner borrhuvudet. När borrhväskan blandas används en mixercontainer för att det krävs väldigt stora mängder vid större projekt. Det finns flera olika recept beroende på vilken geoteknisk förutsättning det borraras i och hur väl borrhålet skall stå sig.

De viktigaste komponenterna är bentonit samt tillsatsmedel som polymerer vars uppgift är att öka bärighet, viskositet och smörjningsförmågan. Det finns även flera andra tillsatser t.ex. för att justera pH-värdet i borrhätskan, förtunna borrhätskan, hjälpa till att lösa upp förlorat flöde och att förhindra att det uppstår klistereffekt mot borrhätskan. Se bilaga 3 för recept och ytterligare information (Baroid, 2014).

2.4 F5 TensiTrak-system

F5 TensiTrak-system är ett system som gör det möjligt till att få liveuppdateringar av borrhätsketryck och dragkrafter på röret vid installation under styrd borrhätsning. TensiTrak sändaren är en fristående trådlös anordning som placeras mellan rymmaren och röret för att mäta dragkraften och borrhätsketrycket i realtid och för att sedan sända vidare informationen till en F5-mottagare på marken ovanför borrhålet. F5-mottagaren tar emot, övervakar och sparar liveinformation från installationen och skickar även vidare informationen till en fjärrdisplay i borrhätsningen. Informationen från F5-mottagaren kan uppladdas till en dator genom LWD (log-while-drilling) programvara utrustad med F5-systemet. I datorn kan diagram av vätsketrycket och dragkraften plottas under för hela installationen av mediaröret (Digital Control, 2013 s.9-10).

2.4.1 F5 TensiTrak Transmitter

F5 TensiTrak sändaren består av sensorer som hela tiden sänder information av dragkraft och borrhätsketryck under hemdraget till mottagaren var fjärde sekund. Sändaren visar temperaturen i marken och kan bli upptäckt av mottagaren på ett djup av 18,3m (Digital Control, 2013, s. 11). TensiTrak sändaren har en felmarginal på $\pm 21\text{kPa}$ eller 10 %, beroende på aktuellt borrhätsketryck. För dragkraften är felmarginalen beroende på temperatur i marken och spänningsområde (Digital Control, 2013, s. 39).



Figur 5. Bild på TensiTrak under styrd borrhätsning.

2.4.2 F5 Receiver

F5-mottagaren tar emot livedata på borrhvåsketryck och dragkraft från sändaren i marken och skickar även vidare informationen till fjärrdisplayen i borrhjulet. F5-mottagaren kan spara informationen med datalog funktionen som gör det möjligt att sätta ut flaggor under hemdraget och ladda upp TensiTrak informationen till datorn. F5-mottagaren har möjlighet att spara 20 jobb innan den behöver tömmas och uppladdas till en dator. Mottagaren används även för att spåra på vilket djup TensiTrak sändaren är på (Digital Control, 2013, s. 12).



Figur 6. Bild på F5-mottagaren.

3 Teori

Aktuella värden är hämtade från en geoteknisk undersökning som Stadsbyggnadskontoret i Göteborg och SWECO har genomfört i aktuellt område.

3.1 Geoteknik

I detta kapitel behandlas jordens uppbyggnad med hjälp av klassisk jordmekanik för att kunna förstå och beräkna hur jorden beter sig under styrd borring.

3.1.1 Jordens uppbyggnad

Jordartens uppbyggnad består av ett trefasmaterial med vatten, korn och gas. Kornen bildar jordens lastbärande skelett och emellan kornen bildas luckor som är fyllda med gas, vatten eller bådadera. Bärigheten av jorden beror på innehållet av jordens olika komponenter och dess struktur (Sällfors, 2009, kap. 2.1).

Grundvattnet har stor betydelse för egenskaperna i jorden, där säras det på bundet och fritt. Grundvatten är det vatten som kan passera fritt genom jorden samtidigt som det bundna vattnet är kapillärt eller kemiskt bundet (Sällfors, 2009, kap. 2.4).

Övergången mellan plastisk till flytande konsistens benämns flytgränsen och har beteckningen W_L . Med en falkonapparat kan flytgränsen bestämmas genom tester (SGI, 2008, s 14).

Jordtryckskoefficient K_0 är en koefficient som beskriver förhållandet mellan horisontella och vertikala spänningar i marken (SGI, 2007, s 11).

Skjuvhållfastheten för jord används för att beräkna mycket i geotekniken, bland annat bärighet hos jord. Den odränerade skjuvhållfastheten benämns C_u och brukar förenklas genom konstant värde vid aktuella provpunkten och djupet i jorden (SGI, 2008, s 48).

Förhållandet mellan skjuvspänningar τ och skjuvdeformationer γ ges av sambandet skjuvmodulen G . Skjuvmodulen vid lätt överkonsoliderade och normalkonsoliderade leror $G_{0(NC)}$ kan beräknas genom flytgränsen W_L och odränerade skjuvhållfastheten C_u (SGI, 2008, s 36-37).

$$G = d\tau/d\gamma \quad (1)$$

$$G_{0(NC)} = \frac{504C_u}{W_L} \quad (2)$$

Brottkriterium för jord definieras genom Mohr-Coulomb's brottkriterium (Sällfors, 2009, kap. 5.4).

$$\tau_f = c + \sigma \tan\varphi \quad (3)$$

Där φ är jordens inre friktionsvinkel, c är jordens kohesion vid skärningspunkten med axeln där $\sigma = 0$.

3.1.2 Spänningar i jord

Jordens egenskaper beror mycket på spänningarna i jorden, spänningen ökar med djupet i marken. Totalspänningen i marken är σ_0 (Sällfors, 2009, kap. 3.1).

$$\sigma_0 = \sum g * \rho_i * z_i \text{ eller } \sigma_0 = \sum \gamma_i * z_i \quad (4)$$

Där $g = \text{tyngdaccelarationen (cirka } 10 \text{ m/s}^2\text{)}$
 $\rho_i = \text{skrymdensiteten för respektive lager (t/m}^3\text{)}$
 $z_i = \text{tjocklek för respektive lager (m)}$
 $\gamma_i = \text{Tungheten för respektive lager (kN/m}^3\text{)}$

Tungheten γ_i används ofta vid beräkningar och för att förenkla beräkningarna är tungheten $\gamma_i = g * \rho_i$

Enligt Arkimedes'-princip för jord är totalspänningen uppdelad i två delar, effektivspänning σ'_0 och porvattentryck u . Delen av totalspänningen som bärs av kornskelettet är effektivspänningen och resten av totalspänningen överförs via porvatten och är portrycket (Sällfors, 2009, kap. 3.2).

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad (5)$$

Portrycket u beror på vilken nivå grundvattenytan ligger på, varje meter under grundvattenytan ökar portrycket med ungefär 10kPa (Sällfors, 2009, kap. 3.2).

3.2 Vätsketryck

Vätskas tryck p ökar konstant med djupet, där trycket för en vätska är av sambandet mellan hydrostatisk tryck och djupet (Häggström, 2009, s. 13-14).

$$p = \rho * g * h \quad (6)$$

Där $g =$ tyngdaccelerationen (cirka 10 m/s^2)
 $\rho =$ densiteten (kg/m^3)
 $h =$ djupet (m)

Strömning av vätskor kan särskiljas mellan två olika strömningstillstånd, laminär- och turbulent strömning. Vid turbulent strömning finns det virvlar och hastigheten varierar. Vid det andra strömningstillståndet, laminär strömning, är strömningshastigheten låg, flödet mycket begränsat och viskositeten hög. För att bestämma om strömningen är laminär eller turbulent använder man sig av Reynolds tal

$$Re = \frac{U * D}{\nu} \quad (7)$$

Där $Re =$ Reynolds tal
 $U =$ medelhastigheten
 $D =$ rördiameter
 $\nu =$ kinematisk viskositet

Om Reynolds tal är mindre än 2000 är strömningen laminär och större än 4000 är strömningen turbulent. Mellan 2000 och 4000 är strömningstillståndet obestämt (Häggström, 2009, s. 49-51).

3.3 Queen's solution

2009 publicerade Hongwei Xia en avhandling som behandlar maximalt vätsketryck i sand och lera när det borraras med metoden styrd borrhning. Innan har det använts en metod som kallas "Delft solution", som överskattar borrhvätsketrycket med mer än 100 % jämfört med Queen's solution.

Den nya metoden tar hänsyn till jordtryckskoefficienten K_0 , som innan det ansattes till 1,0 i "Delft solution" (Xia, 2009, s. iii).

Queen's solution är baserat på 8 antaganden (Xia, 2009, s.144).

- Jämna spänningsförhållanden i den axiella riktningen.
- För en radie av borrhålet R_0 , initiala spänningarna runt borrhålet lyder under Kirsch elastiska lösning för spänningar runt ett cirkulärt hål i en elastisk platta under icke hydrostatiskt initialspänningstillstånd.
- Jorden uppvisar linjär perfekt-elastisk plastisk beteende, som styrs av Mohr-Coulomb skjuvbrotts kriterium.
- Den plastiska zonen runt det expanderade borrhålet antas vara axelsymmetrisk och dess yttre radie tolkas som avståndet mellan mitten av borrhålet och det längsta avståndet till en skjuvbrottspunkt.
- För varje punkt på gränsytan mellan den plastiska zonen och den elastiska zonen, förskjutning har då samma värde som den plastiska punkten som ligger längst bort.
- Förskjutning är oberoende av lägesvinkeln, men är beroende på den maximala plastiska radien $R_{p,max}$.
- Inga volymförändringar sker i den plastiska zonen i odränerat tillstånd.
- Konventionen antar att tryckspänningar och belastningar är positiva, som är vanligt i geoteknik.

För att uppskatta maximalt vätsketryck har Hongwei Xia med hjälp av dessa 8 antaganden kommit fram till två ekvationer, beroende på om jordtryckskoefficienten är större eller mindre än 1,0 (Xia, 2009, s. 147).

$$P_i = C_u + \frac{1}{2}(3K_0 - 1)P_0 - C_u \ln \left(\left(\frac{R_0}{R_p} \right)^2 + \left(\frac{C_u}{G} \right) \right) \text{ för } K_0 < 1,0 \quad (8)$$

$$P_i = C_u + \frac{1}{2}(3 - K_0)P_0 - C_u \ln \left(\left(\frac{R_0}{R_p} \right)^2 + \left(\frac{C_u}{G} \right) \right) \text{ för } K_0 > 1,0 \quad (9)$$

Där P_i är det maximalt tillåtna vätsketrycket

C_u = Odränerad skjuvhållfasthet

P_0 = Effektivspänning (in-situ spänning)

R_0 = Borrhålets radie

R_p = Maximal plastisk radie = $0.5H$

H = Aktuellt borrhdjup

G = Skjuvmodulen = $\frac{504C_u}{W_L}$ (SGI, 2008, s. 37)

W_L = Flytgräns

4 Fältstudie

Fältstudier utfördes av författarna på Styrud Ingenjörskfirma AB när de borrade ledningar för fjärrkyla på sträckan Ullevi-Almedal, framförallt på Fabriksgatan och Sofierogatan i Göteborg. Ledningarna som installerades var av PE-rör av dimensioner 560mm, 400mm och dubbla 400mm. Under hemdragen drogs även mindre ledningar med, för t.ex. fiber för framtida syften. Sträckorna som borrades var ungefär 80-140m långa och alla var i liknande geoteknisk miljö. Under en borring utfördes en mellanrymning innan det påbörjades hemdrag av de dubbla 400mm rören.

Borrmaskinen som användes var en Vermeer D100 med en dragkapacitet på cirka 45 ton och en pumpkapacitet på 567,8 liter/minut (Vermeer Viking, 2015, s. 94). Utrustning som användes under borringarna var svivlar, rymmare och mätverktyget TensiTrak. Vid fältstudierna användes dubbla svivlar för att förhindra rotationen av rören ifall en av svivlarna skulle skära under pågående hemdrag.

Ytterligare fältstudier utfördes i Mölndal centrum när det installerades rör för fjärrkyla i dimensioner 355mm, 120mm och fiberrör. Denna borring gjordes på en Vermeer D60, som är en mindre maskin än D100 (Vermeer Viking, 2015, s. 92). Utrustningen för denna borring var en flycutter rymmare, enkel svivel och TensiTrak. De geotekniska förutsättningar som råder i Mölndal är liknande den som råder i Göteborg.

Under hemdragen mättes väsketryck och dragkrafter på rören som loggades i F5-mottagaren, som användes till att göra ett beräkningsverktyg och för att kontrollera mot Queens solution. Det antecknades även när bakflödet förlorades eller när något extraordinärt hände som markhävning eller blowout.

5 Resultat

Alla värden för att genomföra beräkningarna som berör jordens egenspanning och Queen's solution är hämtade från en geoteknisk undersökning som Stadsbyggnadskontoret i Göteborg och SWECO har genomfört i aktuellt område.

5.1 Hemdrag

Borrningarna från Ullevi till Fabriksgatan har inte varit helt problemfria utan det har både spräckts vattenledningar och hittas gamla husgrunder. Resultatet från de borrningarna som har genomförts redovisas i diagramform. De är genomförda i samma geoteknisk miljö och på liknade längder samt djup. Dessa borrades enbart med vatten istället för en bentonitblandning. Det har även utförts ett hemdrag på Sofierogatan där det användes bentonitblandning som borrhätska.

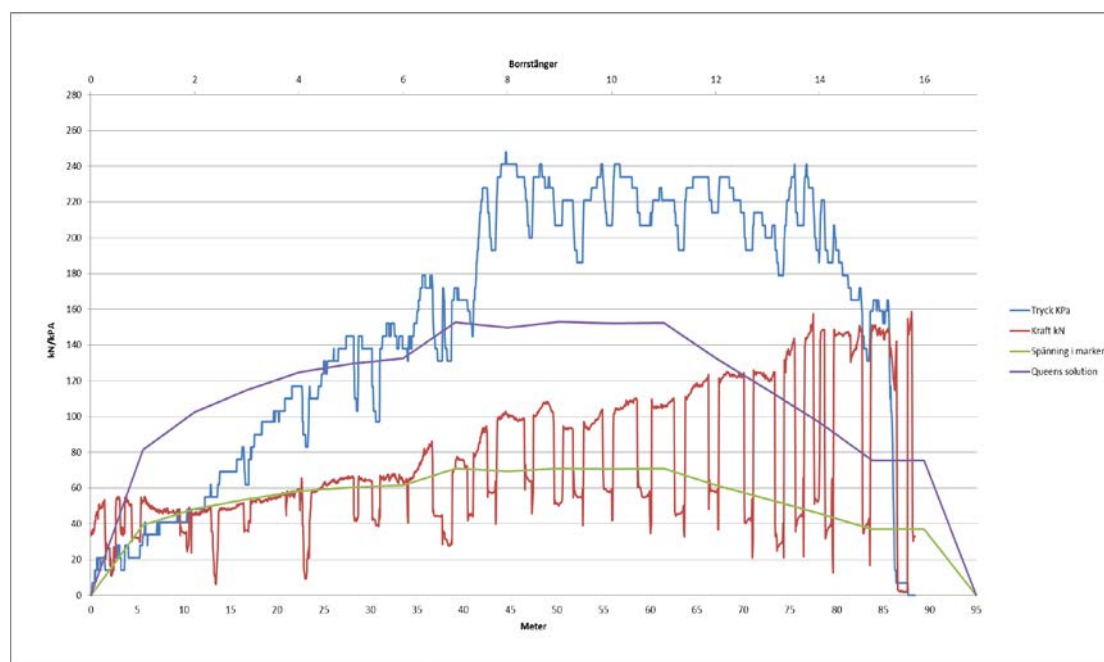
Förklaringar till axlarna och linjerna till diagrammen:

- Övre horisontell axel är antal borrhätskänger
- Under horisontell axel är längden på genomförd borrning i meter
- Vertikal axel är kN eller kPa
- Blå linje är borrhätsketryck
- Röd linje är dragkraft
- Grön linje är markens spänning vid aktuellt djup
- Lila linje är Queen's solution(maximalt tillåtet tryck)

5.1.1 Hemdrag Ullevi, 560rör

Den första borrhningen vid Ullevi var cirka 90m lång och bakflödet tappades först efter 36m, vilket ses att den blå linjen ökar med cirka 0,9bar i den punkten för att sedan ligga konstant på cirka 2,4bar fram tills att vätskan letade sig ut i mottagargropen, vilket kan ses att den blå linjen sjunker drastiskt strax innan 90m. Diagrammet visar att resultatet ligger under tillåtna värden på borrhvatsketrycket under de första 25m för att precis innan förlorat bakflöde passera gränsen för vad marken klarar, vilket ses när den blå linjen passerar den lila. Under tiden som röret vänder uppåt från det djupaste paritet under borrhningen så sjunker den lila linjen, maximalt tillåtet värde för borrhvatskan, samtidigt som borrhvatsketrycket ligger på för höga värden.

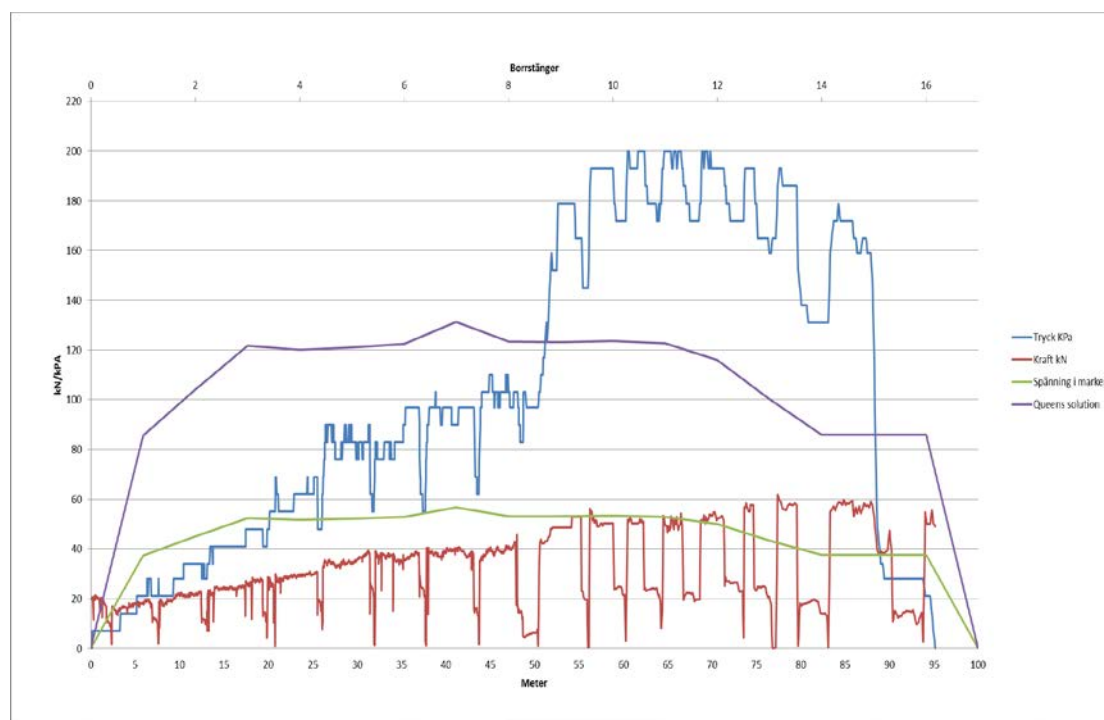
När bakflödet förlorades sänktes pumptrycket på maskinen, draghastigheten och dragkraften ökades, som kan ses på den röda linjen i figuren nedan.



Figur 7. Diagram Hemdrag 1

5.1.2 Hemdrag Fabriksgatan, 400rör

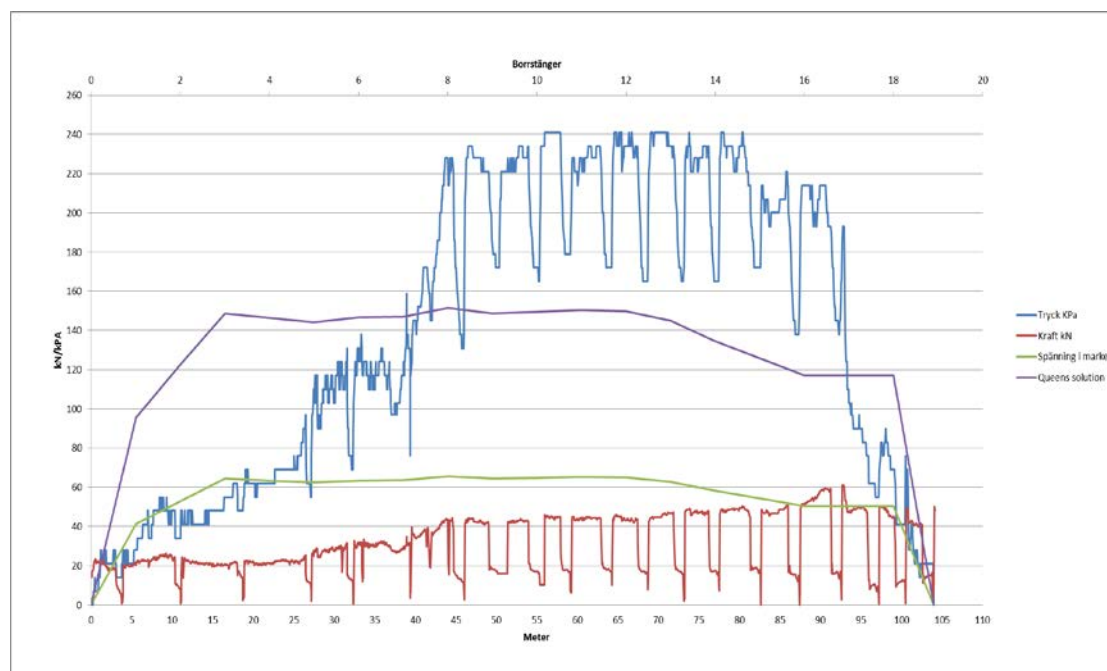
Den första borringen på Fabriksgatan var cirka 95m lång. Borrväsketrycket steg sakt med ökat marktryck och det ökade trycket från pumpningen av borrvätskan. Strax efter 50m steg trycket med 1bar för att lägga sig stabilt vid 2bar. Detta var inte för att bakflödet förlorades utan för att en vattenledning sprack på grund av att ökat tryck i marken. När ledningen sprack tog borrvätskan snabbaste vägen ut tillsammans med vattnet så det blev en blowout och asfalten sprack, vilket Queen's solution förutspådde då trycket låg på 0,8bar över tillåtet värde. När detta hände så indikerades det på mätinstrumentet att något var på gång, men skadan var redan skedd och det gick inte att reparera. Farten ökades samtidigt som dragkraften ökade succesivt fram tills att röret kom ut i mottagargropen. Pumpkapaciteten halverades också.



Figur 8. Diagram Hemdrag 2.

5.1.3 Hemdrag 2 Fabriksgatan, 400rör

Det andra hemdraget på Fabriksgatan var cirka 105m långt och det hemdrag där borrvätsketrycket blev som störst. Redan efter 39m tappades bakflödet och trycket steg från 1,3bar till 2,4bar vilket är långt över tillåtet värde på Queen´s solution. Att bakflödet förlorades upptäcktes snabbt men det fanns tyvärr inget att göra för att få tillbaka det. Effekter av detta var att asfalten började spricka, vilket är en indikation på en markhävning. Ingen vätska letade sig hela vägen upp till ytan, vilket var bara en tidsfråga innan det skulle ha skett. Det syns även tydligt här att trycket sjunker drastiskt när flödet kommer ut i mottagargropen. Dragkraften ökades lite långsammare under detta hemdrag samtidigt som pumpkapaciteten halverades.



Figur 9. Diagram Hemdrag 3.

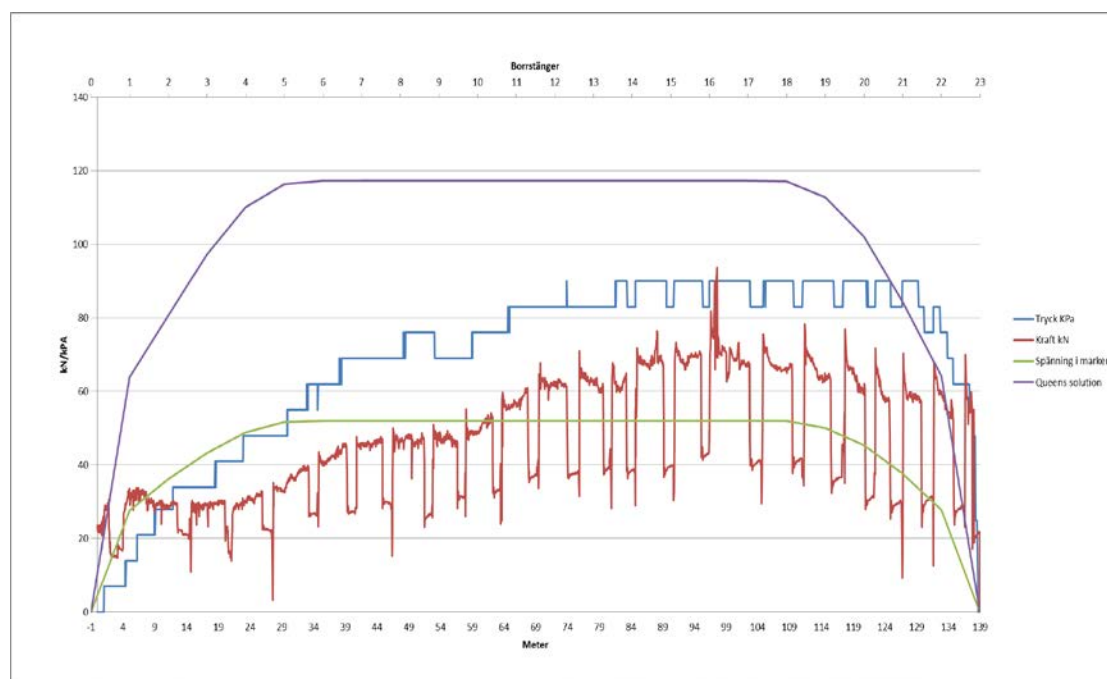
Under dessa tre hemdrag har det noterats att bakflödet är väldigt viktigt för att hålla ett borrvätsketryck under tillåtet värde. Så fort bakflödet förloras ökar trycket med cirka en bar vilket är en markant ökning. När flödet tappats har borrhningen legat på maximalt djup vilket tillåter en större påkänning av borrvätsketrycket, men förloras flödet på grundare nivåer så är det en stor potentiell risk att marken spricker och det kan även leda till en blowout eller en markhävning.

Yrkesarbetarna valde att borra med vatten istället för en bentonitblandning under dessa hemdrag, vilket gör att det är svårare att hålla ett bakflöde på dessa sträckor. Det är ofta bara en tidsfråga innan bakflödet förloras och det är i princip omöjligt att få tillbaka bakflödet då. Detta på grund av att borrvätskan inte får tillräcklig bärighet, vars uppgift är både att hålla uppe borrhålet och frakta ut bormassorna till startgropen. De gör valet av erfarenhet, då de vet att leran i Göteborg är väldigt förlåtande och att det tillåts att bakflödet förloras.

5.1.4 Hemdrag Sofierogatan, 2x400rör

Detta hemdrag är den enda borrning där det har genomförts en mellanrymning och är den längsta borrningen. Den borrarade sträckan låg på 139m och det installerades dubbla 400mm rör. Djupet var ganska grunt under denna borrning, med ett max djup på 7m. Borrningen börjades med att mellanrymma hela sträckan med en 800mm rymmare, för att sedan göra hemdraget med samma rymmare. Effekten av detta var att borrvätsketrycket aldrig steg över 0,9bar vilket är långt under maximalt tillåtet värde och risken för blowout blir minimal. Resultatet visar även att dragkraften inte steg speciellt högt med tanke på att det drogs dubbla 400mm rör. Under detta hemdrag hade man bakflöde hela vägen vilket är en bidragande faktor i att vätsketrycket inte steg långt över markspänningen. Bakflödet kom ut i mottagargropen väldigt tidigt, när det var cirka 25m kvar. Högsta dragkraften i diagrammet beror på att röret fastnade i en grävmaskin.

Detta var även den enda borrningen där de använde sig av en bentonitblandning både på mellanrymningen och hemdraget. Det är även en bidragande faktor att trycket blev lägre då borrhålet hade bättre stabilitet så att det stod sig, samtidigt som effekten av bärigheten från borrvätskan hjälpte till att transportera ut allt material.



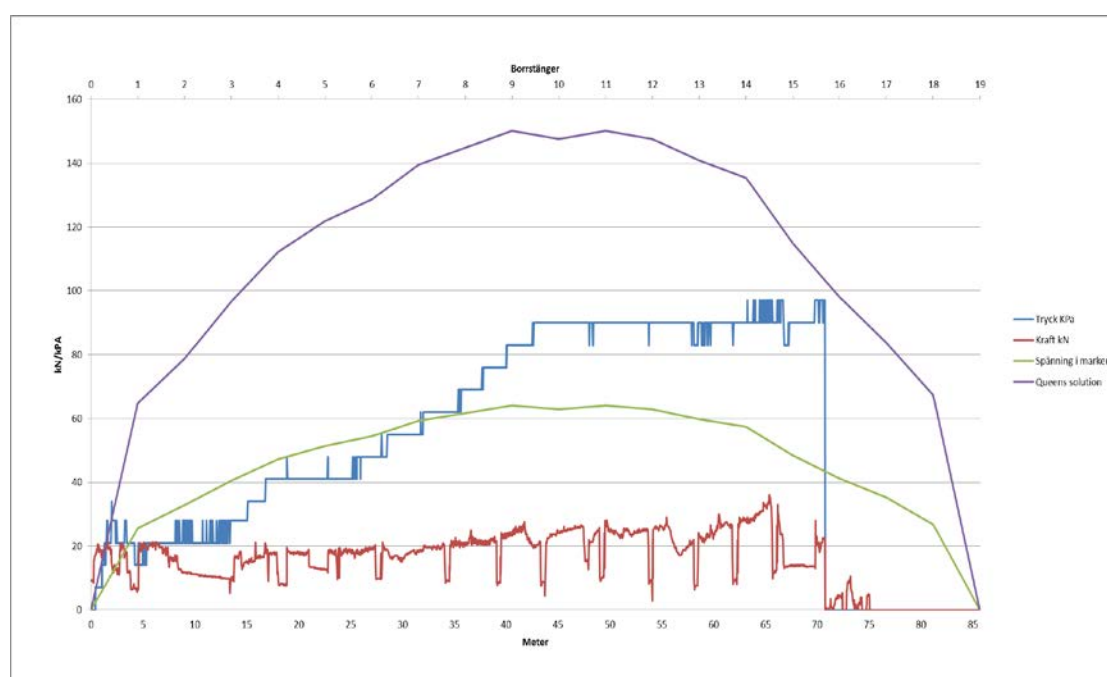
Figur 10. Diagram Hemdrag Sofierogatan.

5.1.5 Hemdrag Mölndal, 355, 120rör

Under ett hemdrag i Mölndalcentrum när ett fjärrkyla rör samt 3 andra rör på cirka 80m installerades lyckades borrningen ha bakflöde hela vägen fram till mottagargropen. Borrningen genomfördes både med en bentonitblandning samt med vatten som borrvätska, där bentonitblandningen endast används de första 15m för att sedan gå över till endast vatten. Rören som installerades hade en diameter på 355mm, 120mm och 2st 10mm och under hemdraget användes en 660mm rymmare. Maskinen i detta fall var en D60 vilket är en mindre maskin än D100. Borrningen var även lite djupare än de andra hemdragen, nästan 9m ner i marken.

Skillnaden från de tidigare hemdragen är marginell vad gäller rörstorlek och rymmarstorlek men de lyckades ha bakflöde hela vägen. Effekten av detta var att borrvätsketrycket knappt steg över vad markens egen spänning vilket minimerade risken för blowout och markhävning.

Den stora skillnaden var farten på denna borrning, då den tog nästan 2.5 timme att genomföra vilket är längre än de tidigare hemdragen med tanke på borrningens längd. Dragkraften från maskinen var även den lägre än tidigare och låg på mellan 2-3 ton på rymmaren. Dessvärre slutade utrustningen att fungera när det var cirka 15m kvar och ingen data loggades, vilket ses i slutet på diagrammet. Detta skedde precis innan bakflödet kom ut i mottagargropen vilket skulle ha resulterat i ett avtagande borrvätsketryck. Under hela borrningen låg borrvätsketrycket under maximalt tillåtet borrvätsketryck, vilket visas i diagrammet.



Figur 11. Diagram Hemdrag Mölndal.

5.2 Dragastighet

Borringarna har visat att hastigheten på hemdraget har betydelse på borrvätsketrycket. Snabbare dragastighet beror på högre dragkraft vilket ger kortare tid för varje borrstång att dras upp. Första hemdraget vid Ullevi åskådliggör i Figur 7 att borrvätsketrycket ökar radikalt när dragkraften och dragastigheten ökar. Hemdraget vid Ullevi ger det högsta borrvätsketrycken av alla mätningar och utsätts för högst dragkraft. Lägre dragkrafter visar motsatt effekt med lägre dragastighet och lägre borrvätsketryck. Lägre dragkrafter och dragastigheter ger längre tid för borringen och ger mer borrhslam. Borrhslamet är jordmaterialet som skall transporteras ut för att kunna installera röret plus all borrvätska maskinen pumpar in under hemdraget. Tar borringen längre tid så pumpas mer borrvätska in vilket leder till mer borrhslam.

5.3 Dragkraft

Dragkraften på rör begränsas beroende på rörets dimension, godstjocklek och materialkvalitet. Under mätningarna har samma material, likande dimensioner och godstjocklek på rören används. Mätningarna har pekat på att dragkraften på rymmaren alltid är lite större än på själva röret. Fältundersökningar med hjälp av TensiTrak har åskådliggjort att dragkraften på rymmaren är mellan en och fyra ton större än vad dragkraften som verkar på röret. Borrprotokollet från hemdraget av fjärrkylan på Fabriksgatan visar att dragkraften på maskinen är högre än vad dragkraften på röret är under hela hemdraget, vilket åskådliggörs i Tabell 1. Se Bilaga 1 för borrprotokoll.

Tabell 1 Dragkrafter över hemdrag Fabriksgatan

Stång nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Längd (m)	6,1	12,1	18,3	24,4	30,5	36,6	42,7	48,8	54,9	61
Dragkraft Maskin(ton)	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7
Dragkraft Rör (ton)	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
67,1	73,2	79,3	85,4	91,5	97,6	103,7	109,8	115,9	122
7	7	7	7	7	7	7	8	8	7
4	4	4	4	5	5	5	6	6	5

F5 TensiTrak-systemet gör det möjligt att visa diagram på datorn hur dragkraften på röret varierar under hela installationen. När maskinen drar ökar dragkraften och vid stångbyte minskar dragkraften på röret. Dragkrafterna i diagrammen stämmer överens med bormaskinistens handskrivna borrprotokoll. Figur 9 visar dragkraften på den röda linjen i kN på röret under hela hemdraget. Där maximala dragkraften enligt diagrammet under hemdraget är 60kN och maximala dragkraften uppskrivet av bormaskinisten är 6ton på röret. Resultatet visar att bormaskinen kan dra mellan en till fyra ton mer än vad röret är dimensionerat för, innan röret överdras.

5.4 Teoretiskt bakflöde

Borringarna har visat att trycket i marken vid borringar inte bara beror på trycket i marken. Trycket beror även på vätskan som pumpas in under borringarna och vilken strömning vätskan har. Där spelar strömningsegenskaperna in, vilken pumpkapacitet pumpen har, vilken muddvikt vätskan har (Häggström, 2009, s. 47). Trycket på vätska vid hydrostatiskt tillstånd går att beräkna med djupet, densiteten och tyngdaccelerationen. Medan tryck för vätska i rörelse inte har kunnat bestämmas teoretiskt, utan antagits till empiriskt värde till 25kPa utifrån borringarna. Under borringarna är borrhvatsketrycket marktrycket plus det empiriska värdet på 25kPa.

Teoretisk bakflöde har även försökts räknats ut med hjälp av formlerna i kapitel 3.2, men har dessvärre inte gett något resultat då vi saknar rätt kompetens för att genomföra dessa beräkningar. Flödestillståndet som vill uppnås under styrd borring är laminärt.

5.5 Beräkningsverktyg för att utvärdera borrhvatsketryck vid förlorat bakflöde

Efter genomförda fältstudier har ett beräkningsverktyg för att simulera olika scenarion vid olika bakflöden under hemdrag. Det har gjorts i Microsoft Excel för att det skall kunna användas utan att ha förkunskap från avancerade program. Programmet räknar ut aktuell markspänning, borrhvatsketryck, längd, borrhjup, markprofil och ritat ut det i ett diagram för att kunna synliggöra när borrhvatsketrycket blir för högt. Den ekvation som har används för att utvärdera borrhvatsketrycket är Queen's solution och där behövs vissa parameterar kännas till för att kunna använda beräkningsverktyget.

Det som behövs ta redan på för att använda verktyget är:

C_u = Odränerad skjuvhållfasthet

W_L = flytgräns

γ = jordens tunghet

K_0 = jordtryckskoefficienten

Grundvattennivån

5.5.1 Antaganden

För att verktyget skall kunna fungera har ett antal antaganden behövts göras.

- Beräkningsverktygen är framtaget till lera där vilojordtrycks koefficienten är mindre än 1,0.
- Vid 100 % bakflöde så motsvarar borrhvatsketrycket spänningen i marken plus 25kPa (empiriskt värde).
- Empiriskt antagande på en tryckökning på 100kPa när bakflödet har slutat helt därefter procentuell ökning av 100kPa.

5.5.2 Guide

Nedan finns det en guide som går igenom hur det fungerar och vad det är som skall kollas efter i diagrammet innan det tas beslut om eventuella åtgärder så som avlastningsgropar eller att alternera borrhögen. De celler som kan ändras är de som är orange.

Guiden är baserad på en fiktiv borrhning på 100meter där det används en 800mm rymmare. Djupet varierar mellan 0-8,56m och är genomförd i lera med en grundvattennivå på 1 meter. Maximal borrhlängd för denna mall är 1000meter.

Steg 1. Börja med är att fylla cellerna B2-B6, B8-B11 och B13.

	A	B
1	Borrstänger	16
2	Längd	100
3	Jordens tunghet, γ	1,65
4	Flytgräns, WL	0,6
5	Grundvattennivå	1
6	Diameter, rymmare	0,8
7	Plastisk radie	0,5*Djupet
8	Odränerad skjuvhållfasthet	15
9	Korrektionsfaktor för Cu	0,93
10	Cu, ökning med djupet	1,2
11	K0	0,65
12	Skjuvhållfasthet, G	504*Cu/WL
13	Borrstång, längd	6,1

Figur 12. Bild till Guide, Steg 1.

Steg 2. Fyll i djupet i cellerna G17-G34 och markprofil/hinder i cellerna J17-J34. Där efter kommer programmet att räkna ut alla aktuella värden så som spänning i marken, korrigerat C_u med djupet, maximal plastisk radie, skjuvmodul och tillslut maximalt tillåtet borrhvatsketryck vid aktuellt djup. Det finns en järnbank som skall passeras under denna borrhning, annars ligger markprofilen på nivå +0.

16	Spänning kPA	Cu	Rp,max	G	Maximalt tillåtet tryck	Längd	Djup från boreplan	Tryckökning	Borrdjup	Markprofil
17	0	0,00	0	0	0	0	0	0,0	0	0
18	29,11	13,95	1,47	11718	64	6,1	2,94	54,1	-2,94	0
19	38,34	14,35	2,18	12055	81	12,2	4,36	63,3	-4,36	0
20	46,01	15,67	2,77	13162	97	18,3	5,54	71,0	-5,54	0
21	52,055	16,71	3,235	14033	110	24,4	6,47	77,1	-6,47	0
22	55,11	17,23	3,47	14474	116	30,5	6,94	80,1	-6,94	0
23	56,475	17,47	3,575	14671	119	36,6	7,15	81,5	-7,15	1
24	59,92	18,06	3,84	15168	126	42,7	7,68	84,9	-7,68	3
25	62	18,41	4	15468	131	48,8	8	87,0	-8	5
26	64,925	18,92	4,225	15890	137	54,9	8,45	139,9	-8,45	5
27	65,64	19,04	4,28	15993	138	61	8,56	140,6	-8,56	3
28	65,64	19,04	4,28	15993	138	67,1	8,56	140,6	-8,56	1
29	59,14	17,92	3,78	15055	125	73,2	7,56	154,1	-7,56	0
30	51,34	16,58	3,18	13930	109	79,3	6,36	146,3	-6,36	0
31	44,45	15,40	2,65	12937	94	85,4	5,3	169,5	-5,3	0
32	38,34	14,35	2,18	12055	81	91,5	4,36	163,3	-4,36	0
33	26,055	13,95	1,235	11718	58	97,6	2,47	151,1	-2,47	0
34	0	0,00	0	0	0	100	0	0,0	0	0

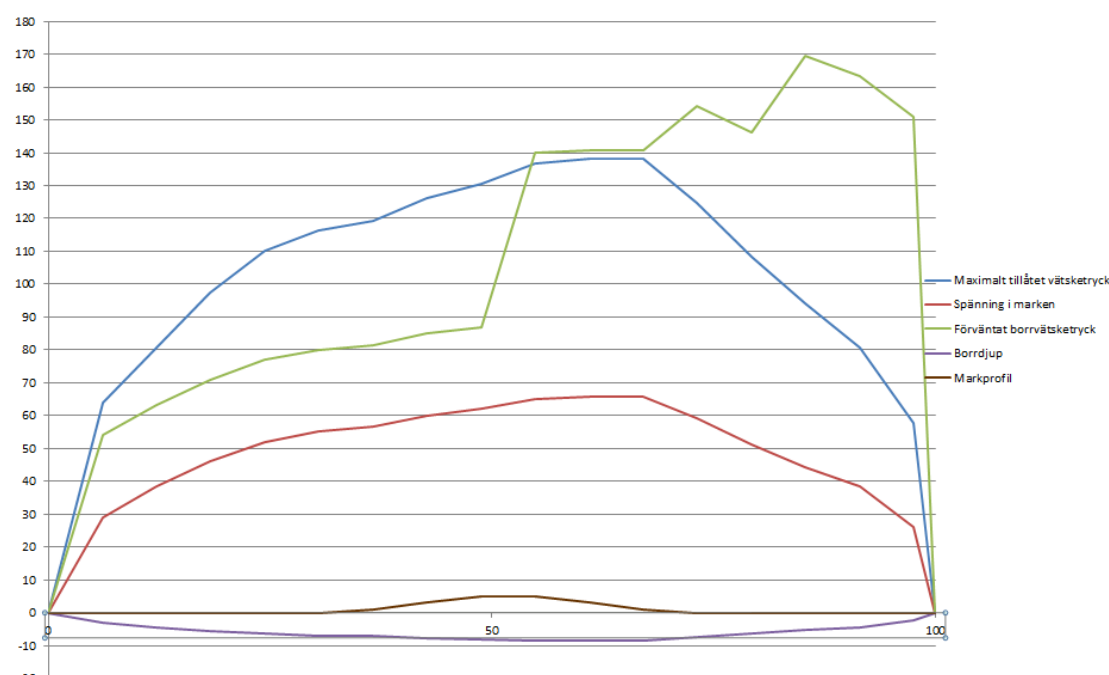
Figur 13. Bild till Guide, Steg 2.

Steg 3. Fyll i G5-G9 under vilken sträckor där det förväntas att ha bakflöde. Det går att välja hur många procent bakflöde som förväntas att ha under dessa sträckor. 100 % bakflöde ger ingen tryckökning men 0 % ger en ökning på 100kPa.

		Sträcka, m		Tryckökning, kPa
Bakflöde	100%	0	20	25
Bakflöde	100%	20	50	25
Bakflöde	50%	50	70	75
Bakflöde	30%	70	80	95
Bakflöde	0%	80	100	125

Figur 14. Bild till Guide, Steg 3.

Steg 4. Nu är allt ifyllt och programmet gör diagrammet



Figur 15. Bild till Guide, Steg 4.

Den blåa linjen är det maximala borrhätsketrycket som får finnas enligt Queen's solution, den röda linjen är spänningen i marken och den gröna är hur trycket förändras när bakflödet förloras. Längst ner är borrdjupet utritat som den lila linjen och markprofilen/hinder som den bruna linjen. När den gröna linjen passerar den blåa börjar det bli kritiskt och blowouts är att förvänta och det blir den kritiska punkten att hålla utkik efter. I detta exempel varierar bakflödet mellan 0-100 % under hela sträckan, och resultatet visar att vid cirka 60m passerar den gröna linjen den blåa och det blir risk för en blowout eller markhöjning. Borrningen passerade järnvägsbanken med för högt värde på borrhätsketrycket vilket kan resultera i att man skadar järnvägsbanken.

5.5.3 Användningsområden

Beräkningsverktyget kan användas till flera saker. Framförallt kan verktyget användas till att utvärdera vilket håll som är optimalt att borra ifrån eller ifall det skall göras avlastningsgropar. När det borrar under känsliga områden så som vägar, järnvägar eller vattendrag, kan det fås en inblick i hur högt trycket blir ifall det märks av att bakflödet börjar minska under det känsliga området för att kunna förhindra blowouts eller markhävning och på så vis spara både tid och pengar.

6 Analys och diskussion

6.1 Borrvätsketryck

Det som kan ses på alla hemdrag, förutom när det har genomförts en mellanrymning, är att förr eller senare passerar gränsen för vad marken klarar av att ha för påkänning från borrvätsketrycket. Även om de många gånger klarar att genomföra borrhningen utan att skapa en blowout eller markhävning så ligger resultatet oftast för högt vad det gäller borrvätsketrycket. Det finns väldigt många faktorer som spelar en stor roll på hur högt borrvätsketrycket blir. De geotekniska förutsättningarna är den första faktorn, många gånger går yrkesarbetarna på empiriska antaganden, för de har borrar där tidigare och sett att det fungerade och då gör de på samma sätt igen.

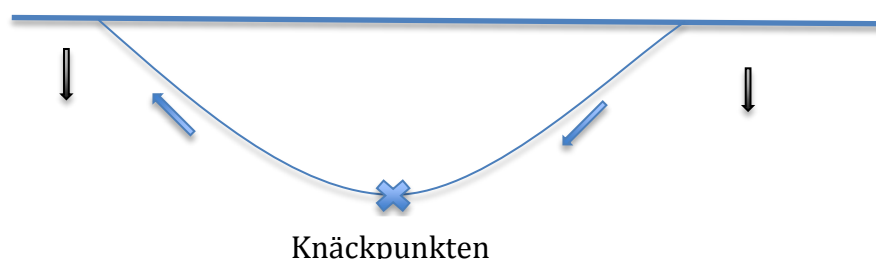
Hur länge borrhningen klarar av att ha ett bakflöde blir även det en avgörande faktor. Klarar yrkesarbetarna av att ha ett bakflöde under hela borrhningen så blir risken för blowout eller markhävning minimal och det blir minst påverkan på marken. I lera blir det oftast väldigt svårt att ha ett bra bakflöde och då görs ofta valet att använda endast vatten under borrhningen istället för en bentonitblandning som borrvätska. Vatten i sig har inte så bra bärighet och ger inte effekten av att bilda en filterkaka runt hålet så att det kan stå sig. När bakflödet förloras tar yrkesarbetarna en avvikande väg gentemot vad de borde göra. Detta val görs för att det idag inte finns någon annan metod att utföra borrhningen vid förlorat flöde. Pumpröret sänks och draghastigheten ökar, för att de blir rädda att orsaka en blowout, markhävning eller i värsta fall att röret fastnar i marken på grund av ett hydrolock.

De gånger som dem lyckas komma ut med röret utan att ha skapat en blowout eller markhävning med ett för högt pumpröret ses som ett lyckat resultat. Men det återstår fortfarande saker dem borde ha i beaktning. När trycket är högre än vad leran klarar av förstörs omkringliggande material även om det inte syns på ytan. Risken för att det skall bli sättningar i omkringliggande bebyggelse ökar med att trycket stiger. Det är idag oklart om det orsakas sättningar efter styrd borrhning. Sättningar visar sig först efter väldigt lång tid och vid det laget är det svårt att avgöra vad de kommer ifrån.

När det görs en mellanrymning av borrhålet och det används en bentonitblandning syns det en tydlig effekt, på vad det gör för borrvätsketrycket och bakflödet. Resultatet visar att bakflöde i 139 meter är en väldigt stor ökning gentemot vad de andra hemdragen, där det inte har mellanrymts. Det finns väldigt många fördelar med detta då borrvätsketrycket håller sig mer konstant och resultatet ligger långt under riskzonen för vad borrvätsketrycket får ha enligt Queen's solutionen.

Kritiska punkter för bakflödet under borrhningarna har uppmärksammats, speciellt vid knäckpunkten, där borrhningen går från att bli djupare till att bli grundare. Det kan finnas flera knäckpunkter under en borrhning då djupet kan variera från grundare till djupare beroende på om det finns hinder i vägen. Vi tror att knäckpunkten gör det svårare för flödet att transporteras bak till slutgropen eftersom det är svårt att först pumpa vätskan ner till knäckpunkten för att sedan pumpa upp vätskan till slutgropen. Vätskan kommer behövas lyftas från knäckpunkten upp till slutgropen, det vill säga att gravitationen kommer att jobba emot pumpkapaciteten vilket gör att det behövs ett högre tryck i vätskan efter knäckpunkten än vid rymmaren för att behålla bakflödet. Detta har endast uppmärksammats då borrhningen har en tydlig knäckpunkt och går

skarpt från maximalt djup uppåt mot grundare nivåer. När borrningen är flackare och den kritiska punkten inte är lika markant, resulterar det inte i samma svårighet att pumpa borrvätskan. I figuren nedan kan detta urskiljas med hjälp av pilar.



Figur 16. Knäckpunkt bakflöde.

De svarta pilarna är gravitationen som jobbar först i vätskans riktning när den pumpas nedåt mot knäckpunkten, för att sedan verka i motsatt riktning och de blåa pilarna är borrvätskeflödets riktning.

Beräkningsmallen som vi har skapat är baserad på empiriska värden som vi har uppmärksammat under våra fältstudier. Borrvätsketrycket har legat cirka 25kPa över markens egenspanning vid bakflöde under nästan alla hemdrag, men för att kunna få ett mer exakt värde måste det undersökas mer. Det har gett oss borrvätsketrycket vid 100 % bakflöde i modellen. För att modellen skall fungera så exakt som möjligt krävs det att det görs förundersökning på de värden som behövs, som tungheten på materialet, flytgräns, odränerad skjuvhållfasthet i aktuellt område. I Göteborg kan empiriska antagande göras, ifall erfarenheten finns.

Queen's solution som vi har använt beräknar maximalt tillåtet borrvätsketryck, men denna är baserad endast från Delft solution och labbförsök. Dessa labbförsök är inget mot en riktig borrning, för att i labben har de endast borrats rakt fram. Under en borrning kommer förändringar ställa till det för borrvätsketrycket då Queen's solution inte tar hänsyn till eventuella svängar under borrningen. Det behövs ytterligare undersökningar i fält för att kunna bekräfta Queen's solution, men vi har sett att den verkar ligga inom rimliga nivåer.

6.2 Dragastighet

Borrvätsketrycket beror inte bara på vilken dragkraft som bormaskinen har utan även på vilken dragastighet som det borrar med. När bormaskinen drar med högre hastighet genererar det ett högre borrvätsketryck för att det samlas mer massor framför röret. Dragastigheten ökas markant vid förlorat bakflöde för att inte röret skall fastna i marken vilket har iakttagits under fältstudierna. Vi har även märkt att bormaskinen kan hålla en högre hastighet ifall det genomförs en mellanrymning av hålet innan det påbörjas ett hemdrag.

6.3 Dragkraft

Under våra mätningar har vi inte varit med om att dimensionen, godstjockleken eller hållfastheten på rören har varit något problem. Vi har inte dragit i de krafterna som behövs för att överdra rören. Vi har tappat bakflöde eller liknande innan vi har uppkommit i de krafterna. Det vi har sett är att dragkraften på maskinen är större än den aktuella dragkraften på röret. Maskinen kan dra med en högre dragkraft än vad röret klarar av så länge man använder sig av rymmare och maskinerna Styrud använder idag för att genomföra borrhningar med större rördimensioner. För att kunna göra ännu mer noggrannare mätningar och kunna bedöma exakt hur mycket mer dragkraft maskinerna kan dra än vad rören klarar av behövs mer och noggrannare undersökningar, med bättre dokumentation. Värdena kommer skiljas på olika dimensioner, godstjocklek och hållfasthet för olika rör. Värdena kommer även bero på vilken maskin som används och hur kraften är distribuerad mellan rymmaren och röret. Dragkraften på röret är inte det största problemet vid styrd borrhning. Det största problemet är att ha ett bibehållet bakflöde och hålla borrhvåtsketrycket under tillåtna nivåer.

6.4 Teoretiskt bakflöde

För att bestämma hur trycket på en vätska i rörelse ändras krävs tidskrävande och avancerade datorberäkningar. Beräkningarna kan även behöva kompletteras av laboratorieförsök för att få bra värden. Kvalifikationen för att utföra beräkningarna ligger utanför vår kompetens, eventuellt på forskarnivå. Beräkningarna har blivit uteslutna för att istället använda ett empiriskt värde för trycket på 25kPa när vi har ett bakflöde på 100 %.

Teoretiskt bakflöde har även varit svårt att räkna ut beroende på trycket på vätska i rörelse. Informationen som vi har använt kommer i från Haggströms hydraulikbok, som behandlar vätska i rörelse inuti rör och inte utanför rören som vår vätska kommer att röra sig i. Vår största friktionsförlust blir mot hålets jordmaterial istället för mot röret. Vi har inte kunnat uppskatta någon riktigt sandråhet för jorden och inte kunnat mäta friktionsförluster eller hastigheten på vätskan som kommer ut. För att kunna göra bättre mätningar på teoretiskt bakflöde behövs vätskans hastighet mätas på flera ställen under borrhningen, och muddvikten på vätskan behövs både mätas i mixercontainern och i startgropen.

6.5 TensiTrak felmarginal

Enligt kapitel 2.4.1 har TensiTraken en felmarginal som vi inte har tagit hänsyn till. Resultaten vi har fått kan ha en differens mot vad det egentliga borrhvåtsketrycket har legat på för värde och behöver inte vara så farligt som vissa av diagrammen kan antyda på. TensiTraken ger ändå en väldigt bra indikation vad som händer i marken under styrd borrhning, mycket på grund av att den skickar informationen live, både till maskinisten samt den personen som går på marken ovanför.

7 Slutsatser

Resultat visar att om yrkesarbetarna kan upprätthålla ett perfekt hål under styrd borrhning minskar problemen. Fältundersökningarna visar på att om de har ett borrhväskestryck strax över marktrycket på givet djup men mindre än maximalt tryck enligt Queen's solution, minskar riskerna för blowout eller markhävning. Med ett borrhväskestryck som ligger mellan marktrycket och trycket uträknat från Queen's solution kan det i bästa fall existera ett bakflödet hela vägen tills bakflödet kommer ut i mottagargropen. Det viktiga är att få ett hål som står sig och tillåter ett bakflöde.

Genom att utföra styrd borrhning på rätt sätt har bäst resultat uppvisats, genom att mellanrymma innan hemdrag och genom att borra med bentonitblandning som borrhväska under hemdraget. Det har gett bättre förutsättningar för att behålla bakflöde under hela hemdraget och minskat riskerna för oförutsägbara händelser.

Dragkraften på större bormaskiner är mellan en till fyra ton mer än vad dragkraften är på röret. Det beror på hur mycket kraft som distribueras på rymmaren, om hålet har mellanrymts, geotekniken i marken och om rymmaren endast drar eller borrar. Resultaten visar att inte rören överdras, men detta har bara påvisats på större rör än 400mm, men på mindre rör saknar vi mätdata och kan inte konstatera om man överdrar rören eller inte.

En beräkningsmall har framställts med hjälp av marktryck, Queen's solutions och empiriska erfarenheter. Där kan ett intervall uppskattas för vad borrhväskestrycket kan ligga emellan under borrhningen utan att risk för blowout eller markhävning inträffar. Mallen kan också uppskatta vad som händer när en del av bakflödet förloras, genom våra empiriska erfarenheter utifrån fältstudierna.

Trycket på en vätska i rörelse varierar med strömningen och är väldigt intressant för borrhväskestrycket, dock är den svår att bestämma praktiskt och behöver mer kompetens. I samband med detta tycker vi att knäckpunkten är intressant också, vilket det borde göras fler mätningar på, för att kunna bekräfta vårt resultat. Det kan även vara värt att ha i åtanke vid projektering att man undviker extremt skarpa knäckpunkter som i sin tur kan resultera i ett bättre bakflöde.

Tips till framtida studier inom styrd borrhning och borrhväskestrycket skulle kunna handla om styrd borrhnings påverkan på framtida sättningar, muddviktens påverkan för att behålla bakflöde och pumptryckets påverkan för borrhväskestrycket. Att göra labbförsök och datorsimuleringar i MATLAB/FEM på styrd borrhning för att få bättre förståelse. Ett annat område är att undersöka hur borrhväskestrycket blir i andra geotekniker än lera t.ex. sand.

8 Referenser

Baroid (2014): *Baroid Horizontal Directional Drilling Mudmaster*.

Bayer, H. J. (2005): *HDD Practice Handbook*, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, Tyskland

Digital Control (2013): *DigiTrak F5, TensiTrak pullback and pressure monitoring system operator's manual*, Digital Control, Kent, Washington, USA. Hämtad från http://www.digitalcontrol.com/support/Manuals/TensiTrak/TensiTrak_Manual_English.pdf

Göteborgs Stad, Stadsbyggnadskontoret (2011): *Detaljerad stabilitetsutredning inom Göteborgs stad Delområde S123*, Uppdragsnummer 2305 401.

Häggeström, S. (2009): *Hydraulik: för samhällsbyggnad*. Stockholm: Liber AB.

Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P. E., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007): *Information 3, Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord*. Statens geotekniska institut (SIG), Linköping

Larsson, R. (2008): *Information 1, Jords egenskaper*. Statens geotekniska institut (SGI), Linköping

Sällfors, G. (2009): *Geoteknik: Jordmateriallära – Jordmekanik*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Vermeer (2015): *Vermeer Viking produkt-broschyr*. Vermeer Viking AB, Askersund. Hämtad från <http://www.vermeerviking.se/wp-content/uploads/2012/02/Vermeer-Viking-produktbroschyr-rev02.pdf>

Xia, H. (2009): *Investigation of maximum mud pressure within sand and clay during horizontal directional drilling*, Queen's University, Department of Civil Engineering, Kingston, Ontario, Canada.

Bilaga 1

Borrprotokoll Fabriksgatan Hemdrag 2

EXDIES SATEN
NORR
CRACK

Projektnamn		FK Ullevi-Almedal										
Projekt nr												
Beställare		Peab										
Stång	Längd (m)	Dragkraft Maskin (ton)	Dragkraft Rör (ton)	Draghast (min/stång)	Klockslag stångbytte	Pumpvol (lit/min)	Sondtryck (Psi)	Pumptryck (bar)	Stånglängd Muddvikt (kg/lit)	Viskostet (Pas)	pH	Kommentar (hinderhva tillsatser/förändring i borslam)
1	6.1	9	2	10	2332	40	3				3.8	
2	12.2	9	2		2245	450	7				5.4	
3	18.3	9	2		2257	450	9				6.3	
4	24.4	6	3		2310	u	13				7.9	9 vid utspj
5	30.5	6	3		2319	u	11				8.2	
6	36.6	6	3		2332	u	11				8.8	13
7	42.7	7	4		2318	250	33				8.8	20
8	48.8	7	4		2352	200	33				9.1	25
9	54.9	7	4		2352	u	33				9	25
10	61	7	4				35				↑	26
11	67.1	7	4		0005	u	35				8.7	27
12	73.2	7	4		0008		35				8.8	29
13	79.3	7	4		0013		34				8.6	29
14	85.4	7	4		0016		34				8.6	29
15	91.5	7	4		0021		34				8.6	29
16	97.6	7	4		0025		30				8.1	20 RR
17	103.7	7	4		0030		29				8.1	20 RR
18	109.8	7	4		0033		19				6.5	20 RR
19	115.9	8	5				12					
20	122											
21	128.1											
22	134.2											
23	140.3											
24	146.4											
25	152.5											

STYRUD

Bilaga 2

Borrprotokoll Sofierogatan

Projekt		FK Ullevi- Almedal		Arbetsledare		Fredrik Johansson		Arbetsledare		Fredrik Johansson		Arbetsledare		Fredrik Johansson	
Stång	Längd (m)	Peab Dragkraft Maskin (ton)	Dragkraft Rör (ton)	Draghast (min/stång)	Klockslag stångbyte	Pumpvol (lit/min)	Sondtryck (PSI)	Pumptryck (bar)	Stånglängd (kg/lit)	Viskositet (Pas)	pH	Kommentar (hinderfylla tillsätsförändring i borsläm)			
1	6,1		20	17 min	09:11	500	8	50							
2	12,2	6,5	28	13	09:21		7	38							
3	18,3		30	8	09:50		9								
4	24,4		38	6:30	10:00		10								
5	30,5		43	6	10:10		10								
6	36,6		46	6:38	10:16		10	20							
7	42,7		47	6:11	10:25		11								
8	48,8	7,5	47	6	10:32		10								
9	54,9		52	6	10:40		10	30							
10	61		60	6	10:49		12								
11	67,1		67	6:31	10:57		12								
12	73,2		60	3:30	11:06										
13	79,3		61	6	11:09										
14	85,4	11	66	6	11:17		13								
15	91,5	10	70	6	11:25		12								
16	97,6		66	6	11:34		12								
17	103,7		67	4:50	11:40		11								
18	109,8		64	4	11:45		13	20							
19	115,9	9	60	3:50	11:51		12								
20	122		57	2:40	11:54		12								
21	128,1		58	2:50	11:59		13								
22	134,2		57	2:00	12:03		9								
23	140,3														
24	146,4														
25	152,5														

09:10 Bortlysning

Jonasbond@me.com



Skarv msk. ASD 94k

KB

Bilaga 3

Bariod Mud Master

MARKETS

- ❖ WATER WELL
- ❖ HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING
- ❖ TUNNELLING (MICRO)
- ❖ GEOTHERMAL



**HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING
MUDMASTER**

Your local distributor:



JLM Ditch Witch

CAPABILITIES

- ❖ RESEARCH AND DEVELOPMENT
- ❖ CUSTOMER TRAINING SEMINARS
- ❖ INTERNATIONAL TRAINING CENTRE
- ❖ FIELD SUPPORT ENGINEERS
- ❖ QUALITY ASSURED PRODUCTION WIDE DISTRIBUTION
- ❖ CUSTOMER PARTNERING

Cebo Holland
 Westerdijkweg 1
 NL-1976 BV IJMUIDEN
 P.O. Box 70
 NL-1970 AB IJMUIDEN
 The Netherlands
 Tel.: +31 255-546262
 Fax: +31 255-546202
 info@cebo.com
 www.cebo.com

JLM Scandinavia AB, Filipsvegatan 8, SE-213 76 MÅLMÖ
 Tel no: +46 (0)40 671 14 80.
 e-mail: jlm@jlm.se, web: www.jlm.se

	Beskrivning	■ Primär funktion □ Sekundär							Rekommenderad blandning per m ³
		Viskositet	Förtunning	Filtering	Klistereffekt	Smörjning	Bärighet	Hämmare	
TUNNEL-GEL™ Plus	Viskositetshöjande och stabiliserande	■		■			□		20 - 35 kg
TUNNEL-GEL™ SW	Bentonit för saltvatten	■		■			□		20 - 35 kg
BORE-GEL	Horisontalborrningspulver		■						25 - 60 kg
AQUACLEAR® PFD	Reducering av ytspänning/Förtunning		■						0,5 - 2 liter
BIO-BORE™	Biologiskt nedbrytbar			■			□		25 - 45 kg
IDP-496	Smörjande					■			5 - 10 liter
EZ-MUD® GOLD	Stabiliserande i lera/Relevar filtering			□			■		0,5 - 1,5 kg
NO-SAG®	Ökar bärighet	□					■		0,3 - 1,5 kg
N-SEAL™	För lösning av förlorat flöde								5,0 - 13,6 kg
PENETROL®	Mot klistereffekt på borredskap				■		□		1,0 - 2,0 lit
POLY-BORE™	Borrhål stabilisator	□					■		0,5 - 1,5 kg
QUIK-TROL® GOLD	Filteringskontroll	□		■					0,5 - 1,5 kg
QUIK-TROL® GOLD LV	Filteringskontroll vid låg viskositet			■			□		0,5 - 1,5 kg
SODA ASH	Justerar pH värdet								0,5 - 2,0 kg

Markförhållande	Formation	Problem	Rekommenderad produkt	Rekommenderad blandning (ungefärlig)
Stenrik morän		Hålet kollapsar/Förlorat flöde	TUNNEL-GEL™ Plus IDP-496	25 - 35 kg/m ³
		Ökat vridmoment	NO-SAG®	0,5 - 1,5 kg/m ³
Grus		Hålet kollapsar	TUNNEL-GEL™ Plus N-SEAL™	30 - 35 kg/m ³
		Transport av massor/Ökat vridmoment	NO-SAG®	0,3 - 1,0 kg/m ³
Sand & Grus		Förlorat flöde	TUNNEL-GEL™ Plus N-SEAL™	25 - 30 kg/m ³
		Stabilisering av borrhål	NO-SAG®	0,5 - 1 kg/m ³
Grov Sand		Stabilisering av borrhål	TUNNEL-GEL™ Plus QUIK-TROL® GOLD LV	20 - 25 kg/m ³
		Igenslämning/Transport av massor	NO-SAG®	0,5 - 0,3 kg/m ³
Fin Sand		Stabilisering av borrhål	TUNNEL-GEL™ Plus QUIK-TROL® GOLD LV	25 - 30 kg/m ³
Sand & Lera		Upplösning av leran	TUNNEL-GEL™ Plus	25 - 30 kg/m ³
		Förlorat flöde	QUIK-TROL® GOLD LV EZ-MUD® GOLD	0,5 - 1 kg/m ³
Torr Lera		Vätskesugande massor	TUNNEL-GEL™ Plus	20 - 25 kg/m ³
		Förlorat flöde	EZ-MUD® GOLD PENETROL®	1 - 1,5 kg/m ³
Svällande Lera		Vätskesugande massor	TUNNEL-GEL™ Plus	20 - 25 kg/m ³
		Högt vridmoment	EZ-MUD® GOLD PENETROL®	1 - 1,5 kg/m ³
Klistrig Lera		Bildar klumpar/Förlorat flöde	TUNNEL-GEL™ Plus AQUA-CLEAR® PFD	20 - 25 kg/m ³
		Igensatta munstycken	PENETROL® EZ-MUD® GOLD	1 liter/m ³

Borrvätska Egenskaper	Test utrustning	Avläsning	Resultat	Rekommenderad åtgärd
Total hårdhet	Indikator strips	Hårdhet > 100 mg/l	Dåligt utnyttjande av produkttegenskaperna	Tillsätt 0,5 - 1 kg/m ³ Soda Ash för att nå önskad hårdhet mindre än 100 mg/l och pH mellan 8,5-9,5
			Reducerad bärighet att uppnå viskositet	
pH	Indikator strips	pH < 7,0	Reducerad blandningskapacitet	Re-circulation - använd kontroll utrustning för fasta ämnen eller som sista utväg; späd
			Ökad blandningstid	
Mud vikt	Baroid Mud Våg	Mud Vikt > 1,2 kg/liter	Fastnat med röret	Ingen recirculation - öka pumpshastigheten, minska tryck/drag kraft
			Helt förlorat flöde	
"Marsh" Tratt Viskositet	"Marsh" Tratt	Låg < 40 sec	Dålig transport av massor	Kontrollera hårdhet & pH, öka Bentonit eller Polymer koncentrationen
		Hög > 75 sec	Högt pump tryck	Späd eller tillsätt förunnare, reduceras Bentonit eller Polymer koncentration
Filterings egenskaper	API Filterpress	Filteringshastighet > 15 ml/30 min	Ostabil borrhål	Tillsätt Polymer för filteringskontroll
		Filteringshastighet < 15 ml/30 min	--MÅI	Mät och upprätthåll vätskans egenskaper
Sand innehåll	Sand Innehåll Test Kit	Sand innehåll > 2%	Onormal förslutning på pumpar	Ingen recirculation - öka pumpshastigheten, minska tryck/drag kraft
		Sand innehåll < 2%	--MÅI	Re-circulation - använd kontroll utrustning för fasta ämnen eller som sista utväg; späd

Version: 06-2014
mudmeter-h-swedish

Bilaga 4

Boreplan Sofierogatan

Vermeer



**ATLAS
BORE PLANNER** V3.0A

Do not use or rely upon this ATLAS Bore Planner for avoidance of underground utilities.

STYRUD AB
Plan

Rod	Length m	Dist m	Depth m	L/R m	Pitch %	Azimuth %	Act.Depth m	Act.L/R m	Act.Pitch %
1	6.10	5.87	2.94	0.00	-28.0	0.0			
2	12.20	11.80	4.36	0.00	-19.9	0.0			
3	18.29	17.78	5.54	0.00	-19.4	0.0			
4	24.39	23.81	6.47	0.00	-11.6	0.0			
5	30.48	29.88	6.94	0.00	-3.9	0.0			
6	36.58	35.98	7.00	0.00	0.0	0.0			
7	42.68	42.07	7.00	0.00	0.0	0.0			
8	48.77	48.17	7.00	0.00	0.0	0.0			
9	54.87	54.27	7.00	0.00	0.0	0.0			
10	60.96	60.36	7.00	0.00	0.0	0.0			
11	67.06	66.46	7.00	0.00	0.0	0.0			
12	73.16	72.55	7.00	0.00	0.0	0.0			
13	79.25	78.65	7.00	0.00	0.0	0.0			
14	85.35	84.75	7.00	0.00	0.0	0.0			
15	91.44	90.84	7.00	0.00	0.0	0.0			
16	97.54	96.94	7.00	0.00	0.0	0.0			
17	103.64	103.03	7.00	0.00	0.0	0.0			
18	109.73	109.13	6.99	0.00	1.4	0.0			
19	115.83	115.22	6.67	0.00	9.1	0.0			
20	121.92	121.26	5.89	0.00	16.8	0.0			
21	128.02	127.23	4.62	0.00	24.8	0.0			
22	134.12	133.12	2.97	0.00	26.9	0.0			
23	140.21	139.00	1.30	0.00	28.0	0.0			