



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 21045

Examensarbete 30 hp
Juli 2021

Akademiska sjukhuset

Befintliga geotekniska och hydrogeologiska
förhållanden och dess markförutsättningar för
framtida byggnationer

Maya Bar-Am

Referat

Akademiska sjukhuset - Befintliga geotekniska och hydrogeologiska förhållanden och dess markförutsättningar för framtida byggnationer

Maya Bar-Am

Akademiska sjukhuset är en stor, samhällsviktig verksamhet som har under de senaste tio åren genomgått flertalet ny- och ombyggnationer. Sjukhusområdet är beläget på Uppsalaåsen och befinner sig inom en primär skyddszon, vilket innebär en komplex geologi och krav på aktsamhet av grundvattnet som nyttjas för Uppsalas vattenförsörjning. Marken har visats innehålla stora lerkörtlar och drastiska skiftningar av jordarter, vilket har lett till en sättningsproblematik vid sjukhusområdet. Region Uppsala planerar flertalet ny- och ombyggnationer vid Akademiska sjukhuset och på grund av den komplicerade markbilden önskas en utredning av geotekniken och hydrogeologin vid området. Fokuset i detta examensarbete har legat på sättningsbenägenhet och grundvattnets trycknivåer. Fyra delområden av sjukhusområdet har pekats ut av Region Uppsala för eventuella framtida byggprojekt. Dessa områden är vid parkeringshus T3, produktionsköket, NOP-komplexet samt ny cyklotronbyggnad.

Genomförandet av detta examensarbete har delats in i tre delar; kartläggning av jordlagerföljd, sättningsberäkningar utifrån CRS-försök, samt utredning av grundvattnets trycknivå. Jordlagerföljd har tolkats i GeoSuite med hjälp av 474 sonderingar genomförda av konsultföretaget Bjerking. Sonderingarnas samtliga jordskikt interpolerades och illustrerades som nivåkurvor med hjälp av Topocad. För att utreda jordlagerföljden vid de utvalda områdena skapades åtta tvärsnitt utifrån en 3D-modell konstruerad i Civil 3D. De jordlager som studerats är fyllnadsmaterial, lera, friktionsjord, berg samt markyta. Sättningskapacitet och dess tidsförlopp har beräknats utifrån två CRS-försök och max-, min- och medelvärden av grundvattnets trycknivå under sjukhusområdet har beräknats utifrån 20 års dagliga data från en av Uppsala Vattens mätbrunnar i Stadsträdgården.

Resultaten bekräftar åsens komplexa geologi av varierande lermäktigheter under sjukhusområdet. Det är sannolikt att flertalet byggnationer kräver djupgrundläggning, exempelvis vid parkeringshuset T3 och produktionskökets norra del. De erhållna resultaten visar även knappa lerlager vid andra delområden, vilket innebär mindre sättningsbenägenhet och kräver troligtvis endast ytgrundläggning. De sättningsberäkningar som utförts indikerar att parkeringshuset T3 kommer sjunka 20 till 70 cm efter 158 till 213 år utan grundläggning, något som liknar den pågående sättningen vid byggnaden. Grundvattnets trycknivå har under de senaste 20 åren haft ett medelvärde på + 2,3 m (RH2000) och kommer sannolikt inte fluktuera framåt på grund av den rådande vattendomen. Detta innebär att byggnationer inom vissa delar av sjukhusområdet, exempelvis vid produktionsköket, kommer behöva tillstånd inför byggnation inom den primära skyddszonen, vilket Akademiska sjukhuset är beläget i.

Resultaten ger en god överblick över hydrogeologin vid Akademiska sjukhuset och indikerar hur de utpekade områdena bör projekteras med avseende på grundläggning för hållbart och ekonomiskt bygge. Det krävs dock mer underlag, bland annat fler sonderingar och CRS-försök, för att få en ökad komplexitet av sjukhusområdet i avseende på jordlagerföljd och sättningsbenägenhet.

Nyckelord: Sättningar, CRS-försök, geoteknisk undersökning, Akademiska sjukhuset.

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige*

Abstract

Uppsala University Hospital – Current geotechnical and hydrogeological conditions and their potential for future construction

Maya Bar-Am

Uppsala University Hospital is a large institution of vital societal function and many new buildings have been constructed and others rebuilt during the past ten years. The hospital area is located on Uppsalaåsen and within a primary protection zone, i.e. there is a complex geology and requirements for the protection of the groundwater used for Uppsala's water supply. The ground contains large sections of clay and has drastic changes in soil types. This has resulted in a subsidence problem within the hospital area. Region Uppsala has several plans regarding upcoming constructions at Uppsala University Hospital and due to the complicated soil situation is an investigation of the geotechnics and hydrogeology within the area sought for. The focus of this master thesis is on subsidence capacity and the ground water's pressure levels. Four zones within the hospital area have been pointed out by Region Uppsala for potential future construction projects. The zones are at the parking garage T3, production kitchen, NOP-complex and new cyclotron building.

The master thesis was divided into three parts; locating the soil layer sequence, calculation of subsidence based on CRS tests and study of the ground water's pressure level. The soil layer sequence was construed in GeoSuite based on 474 probes conducted by the consultant company Bjerking. The probes respective soil layer was interpolated and illustrated as level curves using Topocad. Eight cross-sections were made within the zones of extra interest and the sections were made from a 3D-model created in Civil 3D. The soil layers examined throughout the master thesis were filling material, clay, granular soil, rock and ground surface. The subsidence capacity and its time were calculated based on two CRS trials and max-, min- and average values of the ground water's pressure levels under the hospital area was computed based on 20 years of daily data retrieved from a measuring well in Stadsträdgården facilitated by Uppsala Vatten.

The results confirm the ridge complex geology consisting of varying depths of clay under the hospital area. Several buildings will probably require deep foundations, e.g. the parking garage T3. The results also show areas of shallow layers of clay indicating lower risk of subsidence and hence will require a shallow foundation. The conducted subsidence calculations indicate that the parking garage T3 will sink 20 to 70 cm after 158 to 213 years if no foundation is implemented, which is in line with the current subsidence occurring at the building. The ground water's pressure level has had an average value of + 2.3 m (RH2000) during the last 20 years and will probably not fluctuate in the future due to the existing decision on water management. Hence, some buildings within certain parts of the hospital area will require permission prior to construction within the primary zone.

The results establish a valuable overview of the hydrogeology at Uppsala University Hospital and give indications regarding how the foundations in the zones of extra interest should be dimensioned sustainable and economically. However, more data is needed, e.g. additional probes and CRS trials, to gain an increased complexity of the hospital area in respect to soil layer sequences and subsidence tendency.

Key words: subsidence, CRS trials, geotechnical investigation, Uppsala University Hospital.

*Department of Earth Sciences, Uppsala university
Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sweden.*

Förord

Fem års studier på Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet och Sveriges lantbruksuniversitet har kommit till ända! Detta examensarbete har gjorts på beställning av Fastighet och Service vid Region Uppsala i samarbete med Bjerking. Det har varit ett otroligt lärorikt projekt som jag erhållit många nya erfarenheter från.

Jag vill rikta särskilt stort tack till mina två handledare; Jonas Eriksson vid Region Uppsala som givit mig möjligheten till detta intressanta examensarbete och till Henrik Håkansson vid Bjerking som väglett mig inom det geotekniska arbetet. Jag vill även tacka min ämnesgranskare Roger Herbert vid Uppsala Universitet för stadig stöttning och handledning under projektet. Jag vill även rikta ett extra tack till Axel Svensson och Esra Bayoglu Flener vid Bjerking för att de varit mina bollplank när jag satt mig in i nya programvaror och beräkningar. Tack till Eric Beal vid Uppsala Vatten som delat expertis och data gällande grundvatten vid Akademiska sjukhuset.

Tack alla kollegor jag mött vid Region Uppsala och Bjerking som välkomnat mig och mina idéer med öppna armar. Sist, men absolut inte minst, vill jag tacka min familj och vänner! Ni har varit min stora energikälla genom dessa fem år, och hela livet!

Maya Bar-Am

Uppsala, juni 2021

Copyright © Maya Bar-Am och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 21045, ISSN 1401–5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2021, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. (<http://www.diva-portal.org/>)

Populärvetenskaplig sammanfattning

Inför ett husbygge bör marken undersökas för att byggnaden ska stå stadigt långt fram i tiden. Detta går att säkra med rätt typ av grundläggning för att husets bottenplan inte ska sjunka ojämnt ned i marken, något som kan utredas med geoteknisk undersökning. En geoteknisk undersökning studerar en marks egenskaper utifrån ett byggnadsperspektiv, exempelvis vilka jordtyper finns i marken, vad är dess egenskaper och hur ser grundvattenbilden ut. Utifrån detta kan det undvikas att ett hus sjunker, vilket kan härstamma från att marken innehåller stora lager av lera. Akademiska sjukhuset är en samhällsviktig verksamhet som ligger på Uppsalaåsen, en rullstensås som bildades då inlandsisen förflyttades för länge sedan. Denna ås innehåller drastiska skiftningar av jordtyper och stora lerkörtlar. Detta har lett till att vissa hus inom sjukhusområdet sjunker och det är därav viktigt att undersöka marken vid de områden där byggnationer planeras i framtiden. Akademiska sjukhuset ligger även inom en primär skyddszon, det vill säga att områdets grundvatten är skyddat enligt regler och lagar. Detta beror på att Uppsala Vatten använder grundvatten från åsen för att producera dricksvatten till Uppsalas befolkning.

Region Uppsala har beställt detta projekt och har pekat ut fyra platser (område 1–4) av Akademiska sjukhuset för att eventuellt bygga nya hus där. Syftet med detta examensarbete var att undersöka marken vid hela sjukhusområdet med fokus på de fyra utpekade platserna och den rådande problematiken kring sjunkande byggnader. Ett ytterligare syfte var att lokalisera grundvattnets trycknivåer för att veta om tillstånd måste sökas inför bygge inom primär skyddszon. Genomförandet av detta examensarbete har delats in i tre delar; kartläggning av jordlagerföljd, beräkning av hur mycket en anläggning kommer sjunka och utredning av grundvattnets trycknivå. Jordlagerföljd har kartlagts med hjälp av underlag från nästan 500 borrhov utförda av konsultföretaget Bjerking. De jordtyper som kartlagts i form av höjdkurvor är fyllnadsmaterial, lera, friktionsjord (sand, grus och dylikt), berg samt även markyta. Tvärsnitt ned i marken ritades även upp för att se hur den totala jordlagerföljden ser ut samtidigt. Storleken av hur mycket område 1 kommer sjunka och till vilken tid har beräknats samt max-, min- och medelvärden för grundvattnets trycknivå har lokaliserats utifrån 20 års dagliga data.

Resultaten bekräftar att åsen under sjukhuset innehåller varierande tjocklekar av lerlager och att flertalet byggnader, såsom i område 1 och 2, sannolikt kommer kräva grundläggning med pålar som trycks djupt ned i marken. Andra delområden av sjukhuset påvisar mindre lager av lera, vilket innebär att grundläggningen kan göras ytligt då risken att husen sjunker är mindre. Beräkningarna indikerar att byggnaden i område 1 kommer sjunka 20 till 70 cm efter 159 till 213 år om grundläggning inte anläggs. Grundvattnets tryckyta har under de senaste 20 åren haft ett medelvärde på + 2,3 m och kommer troligen ligga kring det värdet framåt då det finns regelverk som stadgat det. Detta innebär att byggnader inom vissa delar av sjukhusområdet, exempelvis område 2, kommer behöva tillstånd inför byggnation inom den primära skyddszonen.

Detta examensarbete ger en god överblick över marken och grundvattnets trycknivå vid Akademiska sjukhuset, vilket indikerar hur hus i de utpekade områdena bör grundläggas för ett hållbart och ekonomiskt bygge. Framåt krävs mer underlag för att få en ökad komplexitet av sjukhusområdets markförhållanden.

Symbolförteckning

Parameter	Symbol	Enhet
Densitet	ρ	ton/m ³
Effektivspänning	σ'	kPa
Egentyngd	γ	kPa/m
Elasticitetsmoduler	M_0, M_L, M'	kPa
Förkonsolideringstryck	σ'_c	kPa
Förändring av totalpotential	dh	m
Förändring i avstånd	dx	m
Grundvattenflöde	Q_{dl}	Volym/tid (exempelvis m ³ /s)
Gränstryck	σ'_L	kPa
Hydraulisk konduktivitet	K	Sträcka/tid (exempelvis m/s)
Kompressionstjörning	ε	Enhetslös
Konflytgräns	W_L	%
Konsolideringsgrad	U	Enhetslös
Konsolideringskoefficient	c_v	kPa
Korrigerad skjuvhållfasthet	$\tau_{fu,korr}$	kPa
Lasts intensitet	q, Q	kN/m ² , kN
Portryck	u	kPa
Reduktionsfaktor	v	Enhetslös
Skjuvhållfasthet	τ_{fu}	kPa
Specifikt grundvattenflöde	q_{dl}	Volym/tid/area (exempelvis m ³ /m ² s)
Tid	t	Tidsenhet (exempelvis s)
Tidsfaktor	T_v	Enhetslös
Totalspänning	σ	kPa
Totalsättning	δ	m
Vattenkvot	W	%

Innehållsförteckning

Referat	i
Abstract	iii
Förord	v
Populärvetenskaplig sammanfattning	vi
Symbolförteckning	vii
1. Introduktion	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Frågeställningar	1
2. Teori	2
2.1 Mark.....	2
2.1.1 Friktionsjord.....	2
2.1.2 Kohesionsjord	2
2.1.3 Fyllnadsmaterial.....	2
2.1.4 Rullstensåsars sammansättning.....	3
2.1.5 Sättning i jord.....	3
2.2 Grundvatten	5
2.3 Grundläggning av byggnation	6
2.3.1 Pålastning	6
2.3.2 Ytgrundläggning	6
2.3.3 Djupgrundläggning	6
2.3.4 Markförstärkning	6
2.4 Provtagningsmetoder	7
2.4.1 Sondering	7
2.4.3 CRS	9
2.4.4 Mätningar av grundvattennivåer	11
2.4.5 Referenssystem	12
2.5 Regelverk och lagstiftning inför byggnation	12
2.5.1 Vattenverksamhet	12
2.5.2 Vattenskyddsområde	12
3. Metod	13
3.1 Områdesbeskrivning	14
3.1.1 Akademiska sjukhuset	14
3.1.2 Geologi.....	15
3.1.3 Hydrologi	16

3.2 Modellering av hydrogeologin	17
3.2.1 Modelleringsunderlag	17
3.2.2 GeoSuite.....	17
3.2.3 Topocad.....	18
3.2.4 Civil 3D.....	18
3.2.5 Grundvattennivåer.....	18
3.3 Sättningsberäkningar	19
3.3.1 CRS-försök	19
3.3.2 Tid till totalsättning.....	22
4. Resultat.....	22
4.1 Kartläggning av markskikt och grundvatten	22
4.1.1 Grundvattennivå.....	22
4.1.2 Jordlager och tvärsnitt.....	23
4.2 Sättningsberäkningar	31
4.2.1 CRS-försök 1	31
4.2.2 CRS-försök 2	35
4.2.3 Sättningstider	38
5. Diskussion	39
5.1 Grundvatten	39
5.2 Jordskikt och tvärsnitt.....	40
5.3 Utredd hydrogeologi och sättningsberäkningar av område 1–4.....	41
5.3.1 Område 1.....	41
5.3.2 Område 2.....	42
5.3.3 Område 3 och 4.....	43
5.4 Rekommendationer.....	43
6. Slutsats.....	44
Referenser	46
Appendix	I
Indata från CRS-analys.....	I
Nivåkurvor över samtliga jordskikt.....	III
Resultat – sättningsberäkningar.....	VIII

1. Introduktion

Inför byggnation krävs gedigen geoteknisk förundersökning som syftar till att fastställa berg-, jord- och grundvattenförhållanden för att förstå en marks egenskaper (SGI 2020 a). Syftet kan exempelvis vara att undersöka en byggnads omedelbara eller framtida sättning för att dimensionera en lämplig grundläggning av byggnationen (Axelsson & Mattson 2016). Om denna typ av undersökning uteblir kan betydande skador uppstå, till exempel kan okunskapen om markens karaktär leda till en sättningsproblematik som påverkar byggnadens stabilitet. En god grundläggning är därav en investering för ett hållbart bygge och enligt Sveriges Geologiska Institut, SGI, (2019 a) går cirka 20 % av den totala byggkostnaden till grundläggning. SGI hävdar även att cirka 33 % av ett byggprojekts kostnader inom kategorin ”brister och fel” går till problematik kopplat till grundläggning och markåtgärder (SGI 2019 a).

Akademiska sjukhuset är en samhällsviktig verksamhet som erbjuder sjukvård och omvårdnad till omkring 700 000 vård sökande personer årligen (Akademiska Sjukhuset 2020). Under de senaste tio åren har många nya, stora byggnader tillkommit inom området samt flertalet ombyggnader har skett (Eriksson 2021). Sjukhuset finns på Uppsalaåsen, vilket innebär att verksamheten är byggd på en mark med komplex geologi; stora lerkörtlar har påträffats och drastiska skiften mellan jordtyp förekommer (ibid.). Detta har lett till en sättningsproblematik för en del byggnader inom sjukhusområdet (ibid.). Parkeringshuset T3, byggt 2015, har exempelvis sjunkit drygt tio cm vid områden där grundläggning gjorts utan pålning, vilket har resulterat i ojämn yta av bottenplan och sprickor i asfalten (ibid.). Under de kommande åren planeras flertalet projekt som berör ombyggnation eller nybygge på sjukhusområdet och det är därav viktigt att markförhållanden är väl utredda.

1.1 Syfte

Detta examensarbete är en undersökning av de geotekniska och hydrogeologiska förhållandena inom området av Akademiska sjukhuset i Uppsala. Projektets syfte är att ta fram underlag och rekommendationer med avseende på hydrogeologin för Region Uppsalas planerade byggnationer inom sjukhusområdet. Fokuset är på den existerande sättningsproblematiken som orsakas av Uppsalaåsens komplexa geologi och fyra särskilt relevanta delområden för byggnation har identifierats och ska undersökas djupare.

1.2 Frågeställningar

- Hur ser hydrogeologin ut på Akademiska sjukhusets område utifrån geotekniska undersökningar?
- Vad är sättningsbenägenheten vid marken för framtida byggnationer vid Akademiska sjukhuset?
- Vilka rekommendationer kan ges inför framtida bebyggelse inom Akademiska sjukhusets område med avseende på de geotekniska och hydrologiska förutsättningarna?

2. Teori

I följande kapitel redovisas den teori relevant för examensarbetet. De områden som berörs är geologi, hydrogeologi och geotekniska begrepp samt beräkningar relaterade till sättningar och dess tidsförlopp.

2.1 Mark

Jord består av tre beståndsdelar; fast, flytande och gas (Axelsson & Mattson 2016).

Sammanslaget bildar dessa fraktioner en komplex markstruktur av varierande textur och täthet (FAO, 2006). Den fasta fraktionen kan bestå av olika stora mineralpartiklar och organiskt material (Eriksson et al. 2013). En jordart beskriver ursprunget av materialet samt den fasta delens mekaniska sammansättning (ibid.). Inom de olika jordarterna finns undergrupper klassificerade efter egenskaper såsom kornstorlek (ibid.). Partiklarnas storlek påverkar jordens mekaniska karaktär, exempelvis sammanhäftning mellan korn och vattenhållningsförmåga (ibid.). Inom geoteknik används termerna friktionsjord och kohesionsjord för att beskriva olika jordtypers hållfasthet (SGI 2020 b).

2.1.1 Friktionsjord

Friktionsjord är material innehållande sand, grus, sten och/eller block (Axelsson & Mattson 2016). Friktionsjord hålls samman med hjälp av friktionskrafter som påverkas av jordens lokalisering under eller ovan grundvattenytan (Eriksson et al. 2013). De sammanhäftande friktionskrafterna minskar under grundvattenytan, vilket betyder att hållfastheten av jorden avtar (SGI 2020 b). Permeabiliteten är hög i friktionsjordar då de består av stora jordpartiklar (Axelsson & Mattson 2016).

2.1.2 Kohesionsjord

Kohesionsjord innefattar främst lerjordar (SGI 2020 b). Siltjordar och jordar med hög fraktion av ler- och silt kan även ha egenskaper likt en kohesionsjord (ibid.). Hållfastheten av kohesionsjordar beror, till skillnad från friktionsjord som endast hålls samman vid direktkontakt, även av den fysikaliska kraften kohesion (ibid.). Denna kraft uppstår på grund av molekylära attraktionskrafter mellan små jordpartiklar (ibid.). Kohesionen tilltar med ökad finkornighet i jorden (Eriksson et al. 2013). Vid en ökad yttre belastning kommer normalkraften mellan lerpartiklar öka, vilket leder till att bindningen mellan partiklarna förstärks ytterligare (ibid.). Jordlagrets lokalisering ovan eller under grundvattenytan påverkar även denna sammanhäftning (SGI 2020 b). Om jordlagret är precis ovan grundvattenytan är det troligt att porerna innehåller både vatten och luftbubblor (ibid.). Omkring bubblorna uppstår ytspänning som bidrar med en sammanhållande kraft mellan partiklarna, vilket kallas för falsk kohesion (ibid.). Likväl bidrar falsk kohesion till ökad hållfasthet i jorden (ibid.). Problemet med falsk kohesion är att då jorden torkar eller mäts med vatten kommer materialet bli instabilt och benäget att falla isär (ibid.). Permeabiliteten är relativt låg i kohesionsjordar då de består av små jordpartiklar (Axelsson & Mattson 2016).

2.1.3 Fyllnadsmaterial

Fyllnadsmassor används bland annat för att jämna ut markytor eller byta ut instabil markstruktur. Innehållet av fyllnadsmassor varierar stort eftersom valet av dessa beror av en rad olika faktorer, exempelvis tillgänglighet och dess egenskaper. Exempel på material för fyllning är kross av berg och tegel. Material såsom trä och avfall kan även nyttjas.

Huvudsaken är att fyllnadsmassor ter annorlunda än kohesionsjordar samt vissa friktionsjordar, exempelvis med avseende på dränering av vatten.

2.1.4 Rullstensåsars sammansättning

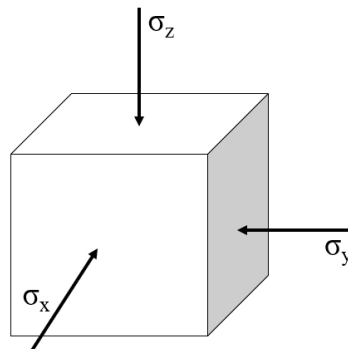
Akademiska sjukhuset är byggt på Uppsalaåsen, en rullstensås, vars sammansättning är relevant för de hydrogeologiska och geotekniska förhållanden som råder där.

Sverige har under långa perioder upplevt flertalet istider, senast under Weichselglacialen som hade sin största utbredning för cirka 20 000 år sedan (Axelsson & Mattson 2016). Dessa nedisningar har format landytan genom slipning av urberg och förflyttning av material då isen avancerat (ibid.). Materialet plockades upp och transporterades med inlandsisen för att senare avsättas via bland annat isens smältvatten (ibid.). Smältvattnet bildade stora isälvar i isen, vilka mynnade ut vid isens front där materialet avsattes ovanpå berggrunden i form av åsar (SGU 2020 a). Det avlagrade materialet benämns som isälvsediment och utgör den geologiska formationen vid namn rullstensås (ibid.). Isälvens strömhastighet vid mynningen påverkade lagringen av sedimenten, vilket har lett till den karaktäristiska uppbyggnaden av en rullstensås; väl sorterat och rundat material där de finkorniga sedimenten, såsom lera och sand, omger de grövre materialen, såsom block och sten (ibid.). Rullstensåsar karakteriseras ofta med drastiska växlingar mellan finare och grövre material (Larsson 2008).

2.1.5 Sättning i jord

I marken verkar olika krafter, vilket påverkar strukturen av jordens kornskelett. En jordmassa i naturlig mark utan last påverkas endast av sin egentyngd och vid belastning påverkas kontaktkrafterna även av den yttre lasten, vilket resulterar i sättningar (Axelsson & Mattson 2016).

Kontaktkrafter verkar mellan samtliga korn i en jord (ibid.). Då det är för omfattande att bestämma kraften mellan respektive jordpartikel studeras jordmassor (ibid.). Dessa krafter benämns som spänning och de verkar både vertikalt och horisontellt på jorden, se Figur 1 (ibid.).



Figur 1. Normalspänningar på jordmassa. Figur baserad på Axelsson & Mattson (2016, s. 107).

Den vertikala spänningen, σ_z , kallas även totalspänning och är totalen av effektivspänningen i vertikalt led, σ' , och portrycket, u (Axelsson & Mattson 2016). Totalspänningen beräknas med (1).

$$\sigma_z = \sigma' + u = \gamma_d * z + u \quad (1)$$

Den effektiva spänningen, σ' , är den parameter som leder till deformation av kornskelettet och beror av jordmassans egentyngd samt eventuell adderad last (Axelsson & Mattson 2016).

Detta innebär att totalspänningen även kan erhållas med hjälp av en jordens egentyngd, γ_d , och djupet, z , till studerad punkt, se (1) (ibid.). Egentyngd beräknas med hjälp av (2) där g är jordens gravitation och ρ är jordens densitet. Om totalspänningen och portrycket är känt kan den effektiva spänningen beräknas med (3), vilket är en omskrivning av (1).

$$\gamma_d = g\rho \quad (2)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

Portrycket, u , beror av vart grundvattnet befins, permeabilitet och eventuell grundvattenströmning (Axelsson & Mattson 2016). Portrycket beräknas med hjälp av (4) där γ_w vattnets egentyngd och z_{gv} är djup till grundvattenyta.

$$u = \gamma_w z_{gv} \quad (4)$$

Denna parameter påverkar den effektiva spänningen (σ' , se ovan) i relation till skjuvspänning (Larsson 2008). Detta samband bestämmer magnituden av massans förändring och dess tidsförlopp (ibid.). Skjuvspänning är den kraft som verkar parallellt till jordmassan, det vill säga ortogonalt till effektivspänningen vilken är riktad vertikalt till materialet (Axelsson & Mattson 2016). Olika jordtyper påverkas varierande av en yttre last beroende av dess kompressionsegenskaper (ibid.). Jord kan komprimeras både elastiskt och plastiskt (ibid.). Den elastiska kompressionen innebär att deformationen återgår till ursprunglig form, medan den plastiska kompressionen innebär en oåterkallelig sammanpressning (Larsson 2008).

Sättningar uppstår då den adderade lasten överförs till kornskelettet och den sättning som sker direkt till följd av detta kallas primär sättning (Axelsson och Matsson 2016). Denna kompression förknippas med begreppet konsolidering (ibid.). Konsolidering avser en jordmassas kompressionsförlopp, främst i vattenmättade jordar (ibid.). Översiktligt innebär konsolidering att den påförda lasten bärs initialt endast av porvattnet i jorden, vilket betyder att kornskelettet inte påverkas (ibid.). Enligt Darcys lag strömmar grundvatten från hög tryckpotential till lägre (för fördjupning, se kapitel 2.2 *Grundvatten*) och således kommer porvattnet strömma från den pålastade regionen bortåt (ibid.). Exempelvis kommer porvattnet strömma upp mot markytan eller ned i underliggande dränerande jordlager (ibid.). Detta gör att porövertrycket minskar och att effektivtrycket ökar på kornskelettet som då komprimeras (ibid.). Efter en tid kommer pålastningens tryck vara större än porövertrycket och kornskelettet når maximal kompression, med andra ord totalsättning (ibid.). Den totala tiden för konsolideringsförloppet beror av jordtypen eftersom den hydrauliska konduktiviteten styr till vilken hastighet vattnet flödar från hög till låg totalpotential (ibid.). Följaktligen kommer en grovkornig jord sättas snabbare än en finkornig jord (ibid.).

För att erhålla en djupare förståelse om mekanismerna bakom sättningar bör begreppen förkonsolideringstryck, normalkonsoliderad samt överkonsoliderad jord tas med i beaktning. En jordprofils olika skikt måste identifieras utefter vilket konsolideringstillstånd som råder eftersom olika ekvationer och moduler används vid beräkning utefter det. Om kompressionsegenskaperna av en jord är kända kan framtida sättningar vid byggnation beräknas samt tid till då olika andelar av sättningen skett (Axelsson & Mattson 2016). Dessa egenskaper kan undersökas med hjälp av ödometer, såsom CRS-försök. Beräkning för detta redovisas under kapitel 2.5.3 *CRS*.

Förkonsolideringstryck

Begreppet förkonsolideringstryck, σ'_c , visar det maximala vertikalktryck under vilket jordmassan konsoliderats (Larsson 2008). Detta tryck kan bero av pålastning, men även av exempelvis fluktuationer i grundvattennivå eller kemiska processer i marken (ibid.). Om det effektiva vertikalktrycket överskrider förkonsolideringstrycket kommer plastisk deformation ske (ibid.). Med hjälp av denna parameter kan jordmassan identifieras som normalkonsoliderad eller överkonsoliderad (ibid.). I en jordprofil kan olika konsolideringstillstånd råda vid olika jordskikt.

Normalkonsoliderat tillstånd

En jordmassa som utsatts för det högsta effektiva vertikalktrycket någonsin benämns som normalkonsoliderad (NC) (Axelsson & Mattson 2016). Vid avlastning av ett NC jordprov kommer den elastiska töjningen innebära en svällning av jorden, medan den plastiska töjningen förblir irreversibel (ibid.).

Överkonsoliderat tillstånd

En jordmassa som avlastats till fullo eller delvis utsätts för ett effektivt vertikalktryck som är mindre än det högst upplevda som kornskelettet någonsin erfarit (Axelsson & Mattson 2016). Detta benämns som överkonsoliderat (OC) tillstånd (ibid.).

2.2 Grundvatten

Grundvatten befinner sig i hydrostatiskt eller hydrodynamiskt tillstånd, där det senare innebär att grundvattnet strömmar genom marken (Axelsson & Mattson 2016). Tillståndet påverkar portrycket, u , i en mark (ibid.). Om en jordmassa är helt torr är $u = 0$ (ibid.). Porerna i en jord uppträder likt kapillärer, dock varierar porernas diameter och form i en naturlig mark (ibid.). En finkornig jord, exempelvis lera, har mindre porradie än grövre jordar, exempelvis sand (ibid.). Detta innebär att den kapillära stighöjden i en finkornig jord är högre än för en grövre (ibid.). Porstorleken påverkar även den hydrauliska konduktiviteten, K , i jorden (MSB 2017). Då grovkorniga jordar, exempelvis friktionsjord av sand, har höga värden för K flödar vatten väl genom dess porer och materialet kan hastigt skifta mellan fuktigt och torrt (ibid.). Motsatt gäller finkorniga jordar, exempelvis kohesionsjord av lera, som har låga värden av K varvid vattnet inte flödar genom och bort från jordmassan snabbt utan transporteras i relativt låg strömningshastighet genom materialet (Axelsson & Mattson 2016). Detta förhållande visas med Darcys lag (5) där Q_{dl} visar magnituden av grundvattenflödet över tid och dh visar förändring av totalpotential över ett avstånd, dx (Bear 1976). Parametern q_{dl} , (6), visar den specifika grundvattenföringen, det vill säga grundvattenföringen över en viss tvärsnittsarea, A (ibid.). Detta påverkar således sammanhäftningen i marken mellan partiklar (MSB 2017). Om marken är väldigt packad kommer genomsläppligheten av grundvatten även sänkas ytterligare, det vill säga då K minskas (ibid.).

$$Q_{dl} = -K \frac{dh}{dx} \quad (5)$$

$$q_{dl} = \frac{Q_{dl}}{A} \quad (6)$$

Grundvattenvariationer kan således leda till ökad eller minskad belastning på kornskelettet (Tremblay 1990). När grundvattnets nivå sänks minskar portrycket, vilket ökar spänningen på jorden (ibid.). Detta leder till att jorden packas och sättningar uppkommer (ibid.) Vid byggnation kan grundvattensänkning vara nödvändigt vid exempelvis schaktning (ibid.).

2.3 Grundläggning av byggnation

Vid byggnation tillförs tillskottsspänningar i jorden in situ, vilket ger upphov till sättningar (Axelsson & Matsson 2016). Det är därav viktigt att utforma rätt grundläggning för att undvika dessa sättningar, stabilitetsbrott och rörelse i marken under bygget och hela anläggningens framtid (SGI 2019 a). Grundläggning av en anläggning kan göras ytligt och djupgående (ibid.). Val av grundläggning görs utefter jordskiktens egenskaper och byggnadens last, vilket fastläggs vid en geoteknisk undersökning (ibid.). Pålastningen kan beräknas utefter en anläggnings dimensioner.

2.3.1 Pålastning

Det finns flertalet metoder för att beräkna en lasts spänningstillskott ned i en jordprofil och vanligen används närmemetoder, exempelvis 2:1-metoden (Axelsson & Matsson 2016). Med denna metod antas det att tillskottsspänningen, $\Delta\sigma'$, från pålastningen sprids i djupet med en utåtgående lutning av 2:1 (ibid.). Tillskottet är störst direkt under anläggningens grundplatta och avtar sedan med djupet (ibid.). Beroende på formen av den pålastande grundplattan finns ett antal ekvationer; (7) för rektangulär last med ändliga sidor (b och l), (8) för en last där l går mot oändligheten samt (9) för en last där både l och b går mot oändligheten (ibid.).

$$\Delta\sigma' = \frac{Q}{(b+z)(l+z)} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma' = \frac{qb}{b+z} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma' = q \quad (9)$$

Variabel q är lastens intensitet i kN/m^2 och Q i kN , där den sistnämnda erhålls med hjälp av (10) (Axelsson & Matsson 2016).

$$Q = qbl \quad (10)$$

2.3.2 Ytgrundläggning

En ytlig grundläggning väljs i regel vid anläggningar som byggs på fast markmaterial, om det är nära till berg eller om det handlar om små laster (SGI 2019 b). Ytgrundläggning avser plattor anlagda vid markytan eller någon meter ned i marken (SGI 2019 a). Dessa plattgrundläggningar är lastfördelade (SGI 2019 b).

2.3.3 Djupgrundläggning

Djupgrundläggning avser olika typer av pålning flertalet meter ned i jordprofilen eller till fast yta såsom berg (SGI 2019 a). Denna djupa grundläggning görs vid större pålastning eller mäktiga jorddjup under byggnad eftersom dessa faktorer ökar risken för sättningar och brott i mark (SGI 2019 b). Det finns ett flertal metoder för djupgrundläggning där pålning eller annan markförstärkning implementeras (ibid.).

En anläggning kan även ha en grundläggning mellan yt- och djupgrundläggning (SGI 2019 b). Det kallas plintgrundläggning och innebär schaktning till fast markmaterial där plitar gjuts (ibid.).

2.3.4 Markförstärkning

Markens bärande förmåga kan förbättras med hjälp av markförstärkande metoder (SGI 2019 b). Förstärkningen innebär exempelvis packning, dränering, lättfyllning och stabilisering av mark (ibid.). Ökad packning och dränering kan uppnås genom anläggning av fyllnadsmaterial

(ibid.). Stabilisering av mark görs genom att applicera ett bindemedel i jorden, exempelvis kalk och cement (ibid.).

2.4 Provtagningsmetoder

Vid en geoteknisk undersökning kartläggs generellt förhållanden av jord, berg och grundvatten (Bergdahl 1984). Provtagningen ger underlag för markens egenskaper samt potentiell markanvändning (ibid.) Den erhållna indata kan ge grund till undersökning av bland annat lämplig placering av byggnation och behov av stabilitetsförstärkning (ibid.). Det finns ett flertal provtagningar för att bedöma jord-, berg- och grundvattenförhållanden (ibid.).

2.4.1 Sondering

Syftet med sondering är att fastställa jordlagerföljd; typ av material och mäktighet av skikten (Larsson 2015). Sondering innebär att en sondspets trycks, vrids eller slås ned i jorden med hjälp av sondstänger (SGF 2013). Olika sonderingsmetoder används utefter vilken jordlagerföljd som förväntas då de har olika förmågor av nedträngning och känslighet (Bergdahl 1984). Sonderingstyp väljs även utefter framkomlighet av instrument och syfte med provtagning (ibid.). Sonderingar klassas som statiska eller dynamiska; om sonden drivs ner med tryck eller slag (SGF 2013). Statische sonderingar har generellt en sämre nedträngningsförmåga än dynamiska, men kan utföra en säkrare bedömning av jordlagerföljd (ibid.). I Figur 2 visas genomförande av sondering och i Tabell 1 återfinns generell information olika typer av jordsonderingar.



Figur 2. Utförande av sonderingsprovtagning (Uppdrag utfört av Bjerking).

Tabell 1. Överblick av de olika sonderingarna.

Sonderingstyp	Statisk eller dynamisk	Generell metod	Jordtyp för tillämpning
Skruvprovtagning	-	Bestämmer skjuvhållfasthet efter omrörning (SGF & BGS 2001). Metod används främst 5 m ned och klassas som ett stort prov (SGF 2013).	Utförs främst i kohesions- och siltjord (SGF 2013). Provtagning är även möjlig i sand och fingrus ovan grundvattenyta, men försämras i stenig mark (ibid.).
Kolvprovtagning (Kv)	-	Ostörd provtagning av lera för sättningsanalys (SGF 2021).	Används i huvudsak för utvärdering av lerjordar (SGF 2021).
Vingborr (Vb)	-	Vingdon drivs ned i mark utan slag eller rotation (SGF 2013). Vingsdonet roterar sedan på uppstannat djup för att mäta odränerad skjuvhållfasthet (ibid.).	Utförs främst i kohesionsjord, främst lera och gyttja (SGF 2013).
Cone Penetration Test (CPT)	Statisk (SGF & BGS 2001).	Cylindrisk sond drivs ned med konstant hastighet på 20 mm/s (Larsson 2015). Mäter spetstryck, mantelfriktion och portryck (ibid.).	Utförs främst i jord med kornstorlek upp till grusfraktion (Larsson 2015). Sonderingen fungerar i både kohesions- och friktionsjord utan sten och block (SGF 2013).
Viktsondering (Vim)	Statisk (SGF & BGS 2001).	Drivs ned genom självsjunkning samt vridning (SGF & BGS 2001). Sonderingen mäter motstånd (ibid.).	Används främst i lösa till medelfasta jordarter som innehåller lite sten och block (SGF 2013).
Trycksondering (T)	Statisk (SGF & BGS 2001).	Sond med vriden spets drivs ned i jord för att registrera motstånd och stångfriktion (SGF 2013). Syftet med sonderingen registrering av jordlagergränser (ibid.).	Används främst i ler- och siltjordar (Håkansson 2021).
Hejarsondering (Hfa)	Dynamisk (SGF & BGS 2001).	Konformad sond som bedömer jordlagerföljd utefter antal slag per 10 eller 20 cm (SGF 2013).	Används främst i friktionsjordar, moräner och liknande där andra sonderingar inte kan drivas ned (SGF 2013).
Jord-bergsondering (Jb)	Dynamisk (SGF & BGS 2001).	Slagen energi överförs till borrhållfasthet (SGF 2013). Borrhållfastheten kan spolas fri med hjälp av luft eller vatten (ibid.). Registrerar jordlagerföljd och djup till berg samt bergskvalité, exempelvis förekomst av sprickor i berg (SGF & BGS 2001).	Klarar alla jordtyper och även bergmassa (SGF 2013).

Utifrån sonderingsproverna kan jordlagerföljden tolkas okulärt ute i fält eller utifrån data över de parametrar sonden registrerat.

2.4.2 Sonderingsstopp

Sonderingsstopp sker då sonden inte kan drivas ned djupare i marken (Larsson 2015). Stoppet kan bero på träff av berggrund, men kan även stanna av vid möte av sten, väldigt fasta moräner, packade sandlager eller att undersökningen inte kräver en djupare sondering (ibid.). Detta innebär att hela jordlagerföljden ned till berggrund inte nödvändigtvis fastställs vid sondering, utan att det kan finnas ytterligare mäktighet av skiktet eller även fler lager under skiktet (ibid.). Det finns olika symboler för typ av sonderingsstopp vid avläsning av provtagning, vilka anger anledningen till att stoppet skett och om berggrund mötts eller ej (SGI 2013).

2.4.3 CRS

En jords kompressionsegenskaper kan undersökas i ett laboratorium med hjälp av en ödometer på upptagna kolvprover, vilket är relevant vid utredning av sättningsbenägenhet (Axelsson & Matsson 2016). Undersökningen innefattar stegvis pålastning av ett jordprov i syfte att utreda kornskelettets kompression (ibid.). Detta görs genom att sambandet mellan det vertikala effektivtrycket, σ' , och vertikala kompressionstjörningen, ε , registreras (ibid.). CRS (Constant Rate of Strain) är en typ av ödometer där lasten inte påförs stegvis, utan konstant (ibid.). Vid denna typ av pålastning sker dräneringen av provet ensidigt, vilket möjliggör kontinuerlig mätning av portrycket under hela kompressionen (ibid.). CRS-försök görs främst av kohesionsjordar och de parametrar som erhålls från försöket är last, deformation, portryck och tid (ibid.).

Vid CRS-försök kan även kompressionsmoduler erhållas, vilka används vid beräkning av sättning (Larsson 2008). Dessa bestäms genom att σ' ökas över ett jordprov, medan deformationer i horisontellt led hindras (ibid.). Modulerna representerar således sambandet mellan ε och σ' (Axelsson och Matsson 2016). Parametern σ'_c representerar förkonsolideringstrycket och σ'_L är gränstrycket (SIS 1991). Tabell 2 visar vilken modul som råder vid vilket tryckintervall.

Tabell 2. Kompressionsmoduler och appliceringsintervall (Larsson 2008).

Modul	Intervall
M_0	$0 < \sigma' < \sigma'_c$
M_L	$\sigma'_c < \sigma' < \sigma'_L$
M'	$\sigma'_L < \sigma'$

Modulerna M_L och M' erhålls direkt vid CRS-försöket, medan modul M_0 kan beräknas med hjälp av (11) utifrån andra parametrar som erhålls med CRS (Axelsson och Matsson 2016). $\tau_{fu,korr}$ är ett justerat värde av skjuvhållfastheten, τ_{fu} (ibid.). τ_{fu} fås från CRS-försöket och korrigeringen sker med hjälp av (12) och (13) (ibid.). Parameter v är en reduktionsfaktor som används för att reducera skjuvhållfastheten med hänsyn till konflytgränsen W_L , där den sistnämnda parametern erhålls från CRS-försök (Håkansson 2021). Denna korrigering är nödvändig då W_L beräknats empiriskt och påverkar skjuvhållfastheten i negativ storleksordning (ibid.).

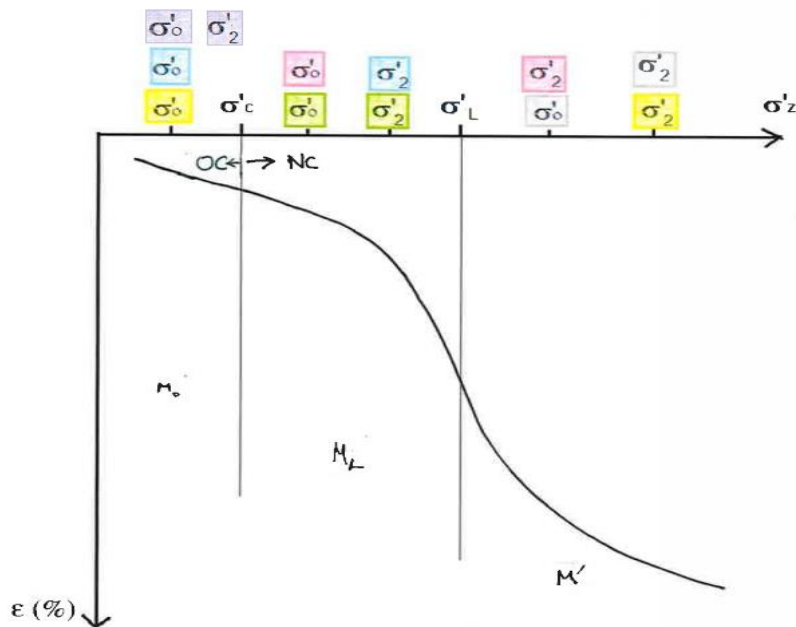
$$M_0 = 250\tau_{fu,korr} \quad (11)$$

$$\tau_{fu,korr} = \tau_{fu} * \nu \quad (12)$$

$$\nu = \left(\frac{0,43}{W_L}\right)^{0,45} \quad (13)$$

Beräkning av sättning

Utifrån CRS-försöken kan konsolideringstillstånd identifieras för olika jordskikt. Detta görs genom att studera värden för σ'_0 och σ'_2 gentemot de erhållna värde för σ'_c och σ'_L . Spänningen σ'_0 står för det vertikala effektivtrycket innan pålastning och σ'_2 efter pålastning. Figur 3 visar hur tillstånden urskiljs och Tabell 3 förklarar hur figuren avläses. Det är nödvändigt att identifiera tillstånden för att möjliggöra beräkning av töjning, ε . Tillståndet påverkar kompressionskapaciteten och därav används olika moduler och ekvationer utefter vilket tillstånd som råder, något som även presenteras i Tabell 3.



Figur 3. CRS-kurva över de olika konsolideringstillstånd (Esra Bayoglu Flener u.å.). Se Tabell 3 för förklaring av hur graf utläses.

Tabell 3. Töjningsberäkning för olika konsolideringstillstånd.

Konsolideringstillstånd	Färg i Figur 3	Formel för töjning, ε (Axelsson & Mattson 2016)
Normalkonsoliderat tillstånd (NC)	Lila	$\varepsilon = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_0}{M_L}$ (14)
Överkonsoliderat tillstånd (OC)	Grönt	$\varepsilon = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_0}{M_0}$ (15)
Konsolideringstillstånd ovan σ'_L	Grått	$\varepsilon = \left(\frac{1}{M'}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_0}\right)$ (16)
Konsolideringstillstånd då σ'_0 och σ'_2 är på varsin sida av σ'_c	Blått	$\varepsilon = \frac{\sigma'_c - \sigma'_0}{M_0} + \frac{\sigma'_2 - \sigma'_c}{M_L}$ (17)
Konsolideringstillstånd då σ'_0 och σ'_2 är på varsin sida av σ'_L	Rosa	$\varepsilon = \frac{\sigma'_L - \sigma'_0}{M_L} + \left(\frac{1}{M'}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_L}\right)$ (18)
Konsolideringstillstånd då σ'_0 är under σ'_c och σ'_2 ovan σ'_L	Gult	$\varepsilon = \frac{\sigma'_c - \sigma'_0}{M_0} + \frac{\sigma'_L - \sigma'_c}{M_L} + \left(\frac{1}{M'}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_2 - \sigma'_0}{\sigma'_L - \sigma'_c}\right)$ (19)

Den totalsättningen, δ , som uppstår vid pålastning kan således erhållas efter att töjningen, ε , i jorden, se Tabell 3, beräknats genom att multiplicera ε med jordskiktets mäktighet, Δz , se (20) (Axelsson & Mattson 2016).

$$\delta = \varepsilon \Delta z \quad (20)$$

Beräkning av tid till sättning

Tid av sättningsförlopp kan erhållas med hjälp av ekvation (21), vilket är en omformulering av ekvationen för den dimensionslösa tidsfaktorn T_v , (22) (Axelsson & Mattson 2016).

Tidsfaktorn tas fram utefter sökt konsolideringsgrad, U (ibid.). Konsolideringsgraden syftar till vilken andel av sättningen som ska studeras och anges utefter ett intervall på 0 till 1 där 1 är 100% sättning (ibid.). Utifrån nomogram med U på y-axeln och T_v på x-axeln kan tidsfaktorn erhållas genom att utläsa var en av de tre dräneringskurvorna lokaliseras på x-axeln för sökt U . De tre dräneringsfallen i nomogrammet representerar dubbeldränering och enkeldränering samt om det endast är egentynngd eller pålastning som bidrar till dräneringen (ibid.).

$$t = \frac{T_v h^2}{c_v} \quad (21)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{h^2} \quad (22)$$

Konsolideringskoefficienten, c_v , bestäms vid CRS-analys. Koefficienten är inte ett statistiskt värde för en jord, utan förändras i takt med ökad pålastning. Parametern h är djupet av jordskiktet som studeras.

2.4.4 Mätningar av grundvattennivåer

Grundvattennivåer mäts i syfte att studera nivåvariationer vid en plats över tid (SGU 2020 b). En strategi är att mäta grundvattennivåer manuellt med exempelvis klucklod (ibid.). På grund av den manuella tillämpningen var denna metod vanligare förr, men då klucklod brukas cirka en till två gånger i månaden har automatiska mätstationer blivit vanligare eftersom de möjliggör kontinuerlig mätning (ibid.). Dessa automatiska mätstationer innefattar en

tryckgivare som mäter grundvattnets trycknivåer dagligen, i vissa fall mer frekvent (ibid.). Exempelvis kan en nivågivare installeras i ett observationsrör för mätning av grundvattennivån som direkt kan avläsas trådlöst vart som helst (Beal 2021).

2.4.5 Referenssystem

I Sverige har fyra precisionsavvägningar gjorts sedan slutet av 1850-talet, vilka har resulterat i nationella höjdsystem som även vidareutvecklats till lokala höjdsystem (Olsson & Eriksson 2015). De nationella höjdsystem som framtagits med hjälp av dessa avvägningar är RH1860, RH00, RH70 och RH2000, där den sistnämnda är Sveriges nuvarande nationella höjdsystem (ibid.) RH2000 precisionsavvägdes mellan år 1979 och 2003, men börjades användas officiellt 2005 (ibid.). Mätningar i Uppsala har således gjorts med olika referenssystem under historien, både i höjd och plan. Höjdsystemet som användes frekvent i Uppsala innan RH2000 standardiserades var det lokala höjdsystemet UK72. För att undvika beblandning av olika system i en karta eller modell kan höjder korrigeras från UK72 till RH2000 genom att addera 0,225 m i z-led (Stadsbyggnadskontoret 2005).

SWEREF 99 är koordinatsystemet som tillämpas på nationell nivå i Sverige, men för att projicera det på lokal nivå är Sverige uppdelat i tretton lokala projektionszoner (Lantmäteriet u.å.). Uppsala ligger i zon 18° 00'E, vilket är inom SWEREF 99-projektionen vid namn SWEREF 99 18 00 (ibid.). Innan SWEREF 99-projektioner blev nationell standard användes Uppsalas Lokala System för plana projektioner i Uppsala. För att undvika beblandning av olika system i en karta eller modell kan koordinater korrigeras med hjälp av ett kommunikationsverktyg i programvaran GeoSuite.

2.5 Regelverk och lagstiftning inför byggnation

Vid byggnation finns regler och lagar kring områdespåverkan. Det finns bestämmelser gällande grundvatten som innebär att förändring av grundvattenbilden vid byggnadsområden ska utredas utifall tillstånd bör sökas eller åtgärder bör implementeras.

2.5.1 Vattenverksamhet

Kapitel 11 i Miljöbalken, MB, innehåller bestämmelser kring vattenverksamheter (Riksdagsförvaltningen 2020). Vattenverksamhet är ett övergripande begrepp för verksamheter som påverkar vattenområden (ibid.). En sådan verksamhet är exempelvis grävning, fyllning och pålning i vattenområde samt avledning eller förändring av grundvattenmängd (ibid.). Enligt MB ska tillstånd av mark- och miljödomstolen sökas vid uppförande eller påverkan av vattenverksamhet (ibid.). Det råder undantag till tillståndsplikten enligt 11 kap. §12 MB om varken allmänna eller enskilda intressen uppenbart skadas utefter att vattenförhållanden påverkas av vattenverksamhetens (ibid.).

2.5.2 Vattenskyddsområde

Ett vattenskyddsområde är en geografisk avgränsning kopplat till föreskrifter över hur yt- och grundvatten ska skyddas (Länsstyrelsen u.å.). Skyddet syftar till att förhindra kontaminering av en existerande eller tilltänkt vattentäkt genom att exempelvis begränsa vissa typer av markanvändning och kemikalier (Riksdagsförvaltningen 2020). Vattenskyddsområden delas in i zoner utefter olika nivåer av skyddsbehov; vattentäktzon, primär skyddszon, sekundär skyddszon och tertiär skyddszon (Naturvårdsverket 2011). De fyra zonerna styrs utifrån olika föreskrifter (ibid.). Inom den primära skyddszonen, även kallad inre skyddszonen, får markarbeten inte ske djupare än tre m ovan den högsta grundvattentryckytan (03FS 1990:1). Massor som används för fyllning eller avjämning som kan potentiellt försämra

grundvattenkvalitén är förbjudna att placera i skyddszonen (ibid.). Likväl för en vattenverksamhet får inte markarbetet medföra bortledning och sänkning av grundvattnet i den inre skyddszonen (ibid.). Vid särskilda skäl kan Länsstyrelsen utdela undantag för verksamhet och om undantag medgetts innan 1990 får verksamheten fortsätta bedriva enligt bestämmelse (ibid.).

3. Metod

Följande tillvägagångssätt har applicerats för att besvara frågeställningarna:

- Litteraturstudie
 - Litteratur har bearbetats för att erhålla relevant bakgrundsinformation i syfte att utveckla metod och diskutera resultat.
- Arkivstudie
 - Relevanta uppdrag genomförda vid Akademiska sjukhuset söktes i Bjerking och Region Uppsalas databas samt i Bjerking fysiska arkiv. Marktekniska undersökningsrapporter (MUR-rapporter), sonderingsprover och CRS-försök var i fokus vid genomgång av tillämpliga uppdrag.
 - Utifrån uppdragen erhöles sonderingar, områdesbeskrivningar, laborationsanalyser och andra parametrar relaterat till markmiljö.
- Sakkunnigast utlåtande
 - Under arbetets gång har personer verksamma inom geoteknik och hydrogeologi kontaktats via e-post eller möten för att bidra med erfarenhet och kunskap för att utforma metoden och ge information om Akademiska sjukhusets tidigare och framtida projekt.
- Fältbesök har genomförts för ökad förståelse av sonderingsmetoder och tolkning av dess data.
- Modellering av hydrogeologin har genomförts med hjälp av GeoSuite, Topocad, AutoCAD och Civil 3D.
- Beräkning av sättningsbenägenhet och tidsförlopp har gjorts med hjälp av Excel.

3.1 Områdesbeskrivning

Syftet med detta examensarbete var att utreda markförhållanden vid Akademiska sjukhuset, se Figur 4 för översiktskarta av området. Projektet har avgränsats till sjukhusområdet norr samt väst om Sjukhusvägen.



Figur 4. Översiktskarta av Akademiska sjukhuset (Region Uppsala 2018).

3.1.1 Akademiska sjukhuset

Akademiska sjukhuset är den största sjukvårdsverksamheten i Uppsala län och har funnits i över 300 år med anor sedan 1300-talet (Akademiska sjukhuset 2020). Figur 5 visar sjukhusområdets norra del, vilket är området som utreds i detta examensarbete. Sjukhusområdet är placerat över en inre vattentäkt på Uppsalaåsen (Uppsala Vatten och Avfall u.å. a). Detta har inneburit att flera stora ny- och ombyggnationer hamnat nära grundvattenytan (Eriksson 2021). Åsens komplexa geotekniska sammansättning har även skapat en sättningsproblematik som lett till stora åtgärdskostnader (ibid.).

Fyra områden har pekats ut av avdelningen Fastighet och Service vid Region Uppsala som särskilt intressanta för utredning av markförutsättningar då de är aktuella för eventuellt nybygge eller ombyggnation, se inringade områden i Figur 5.

Område 1

Parkeringshuset T3, byggdes 2015 och grundlades med pålning endast under pelarkonstruktionerna i byggnaden (Eriksson 2021). Anläggningen har inte försetts med en kontinuerlig grundplatta under hela konstruktionen (ibid.). Detta har resulterat i en sättning på drygt tio cm på cirka



Figur 5. Akademiska sjukhuset med fyra inringade områden. Dessa områden är utpekade av Region Uppsala som särskilt intressanta för ny- eller ombyggnation. Figur baserad på karta från Region Uppsala.

fem år (ibid.). Genom att jämföra beräkningar från CRS-försök på platsen med den uppmätta sättningen kommer T3 agera som validering för hur tillförlitliga och sanna beräkningarna utfaller i detta projekt. Framställning av tvärsnitt över jordlagerföljden på platsen kommer ge indikation av orsaken till sättningen. Beräkningarna kommer även ge en prognos över hur stora sättningarna kommer bli totalt vid T3 samt hur lång tid det kommer ta.

Vid område 1 finns två CRS-försök tillgängliga samt flertalet sonderingar har gjorts för att kartlägga lerans mäktighet på platsen.

Område 2–4

Område 2–4 är potentiella platser för ny- eller ombyggnation av Akademiska sjukhusets verksamheter.

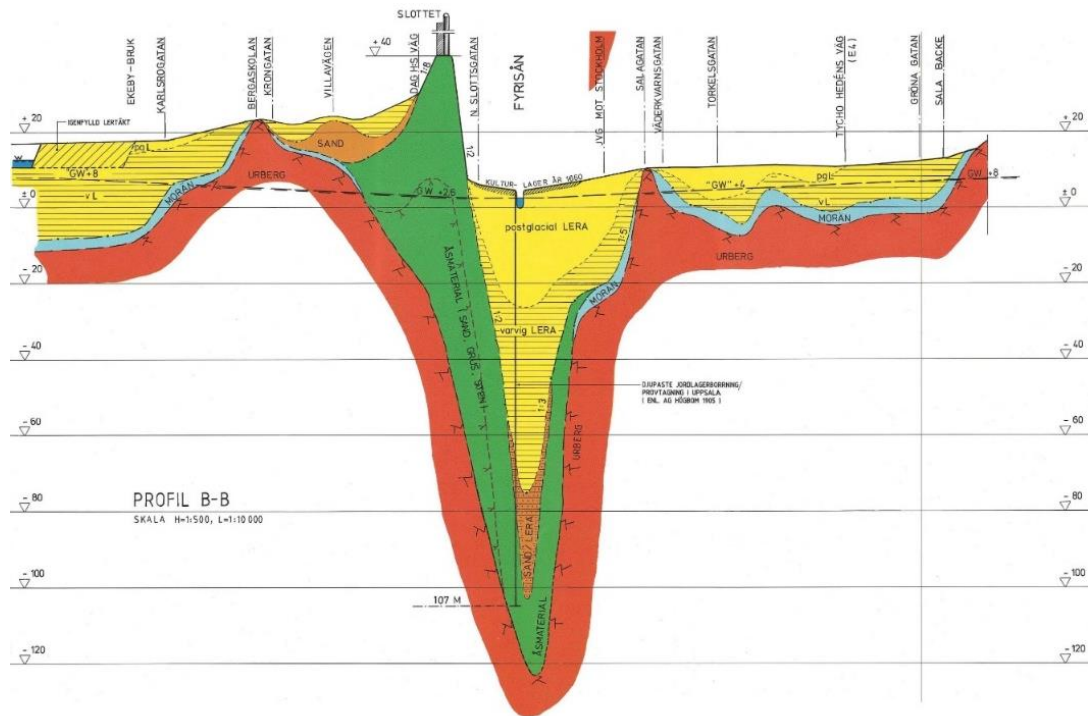
Område 2 är i dagsläget Akademiska sjukhusets produktionskök (husnummer S1 och S2) (Eriksson 2021). Dessa hus planeras att byggas om till ett nytt produktionskök (ibid.). Inom detta område finns flertalet sonderingar tillgängliga, dock inga CRS-försök.

Område 3 innefattar ett komplex av flertalet sammansatta byggnader där husnamnen samtaget kallas NOP. NOP-komplexet har funnits i flera decennier och det finns inga nuvarande planer för nybyggnation av området (Eriksson 2021). Akademiska sjukhuset är tätbebyggt och det finns inte mycket mark ledig för ny exploatering (ibid.). Område 3 har därav pekats ut för potentiell nybyggnation, troligtvis genom att riva det existerande komplexet och anlägga nytt (ibid.). Då NOP byggdes för länge sedan finns inga marktekniska undersökningsrapporter (MUR-rapporter) eller sonderingar tillgängliga idag.

I område 4 projekteras en ny cyklotronbyggnad (Eriksson 2021). Marken har tidigare utretts som problematisk på grund av kuperad terräng, brist på fri yta, kulvert under mark samt eventuella lerlager (ibid.). Det har gjorts geotekniska undersökningar vid platsen, dock finns endast ett fåtal sonderingar tillgängliga som underlag för detta examensarbete. Inga CRS-försök finns dokumenterade i området.

3.1.2 Geologi

Rullstensåsen Uppsalaåsen korsar stora delar av Uppland och passerar under Akademiska sjukhuset (Carlén 2016). Enligt en undersökning av Wall & Sjöberg (2014) uppgår lerdjupet i centrala Uppsala till 100 m och berggrunden under består främst av urgranit (ibid.). I Figur 6 visas ett tvärsnitt av Uppsalaåsen där en stor förkastning innehållande djupt lager av lera syns. Uppsalaåsen består alltså till stora delar av ett lerlager med en varierande mäktighet (Carlén 2016). Centrala Uppsala är tätbebyggt, vilket resulterat i att jordlagret närmast markytan består till stor del av fyllning.



Figur 6. Tvärsnitt av Uppsala åsen i centrala Uppsala. Akademiska sjukhuset ligger söder om Slottet, det vill säga i z-led från slottets markering. Den gula färgen representerar lera. (Figur av SGU, u.å. och hämtad från Bjerking's kartportal)

Isälvs sediment har historiskt använts som fyllnadsmaterial vid byggen eftersom materialet är hållfast och lätt att gräva i (SGU 2020 a). Detta har lett till att åsar nyttjats som täkt för utvinning av avlagringarna i tätbebyggda områden (ibid). Detta är även fallet för Uppsalaåsen under Akademiska sjukhuset där täkten har fyllts igen med ett flertal olika material genom åren, exempelvis tegel, betong och annat avfall (Eriksson 2021).

3.1.3 Hydrologi

Grundvattnet strömmar främst från norr till söder genom Uppsalaåsen och förekommer till störst del genom tillförsel av vatten från omgivande morän, men även från infiltration av nederbörd (Carlén 2016). Uppsalaåsen har en hög hydrauliska kapacitet och används för vattenförsörjningen i Uppsala (Uppsala Vatten och Avfall u.å. a). Akademiska sjukhuset ligger i den inre grundvattentäkten, med andra ord inom den primära skyddszonen (ibid.). Ytvatten från Fyrisån och Tämnaån tillsätts vid Vallskogen knappt 10 km norr om sjukhuset och vid Tunaåsen drygt fem km norr om sjukhuset (ibid.). Det tillsatta vattnet infiltreras sedan genom Uppsalaåsen, vilket skapar naturligt grundvatten på konstgjord väg (ibid.). Grundvattenuttaget för dricksvattenproduktionen från åsen är knappt 50 000 m³ per dygn (Wall & Sjöberg 2014). Uttaget görs vid flera platser i Uppsala varav en vattentäkt lokaliserar i Stadsträdgården intill Akademiska sjukhuset (Djurberg 2004). Uppsala Vatten och Avfall, även kallat Uppsala Vatten, har brunnar för råvattenuttag i Stadsträdgården sydöst om Akademiska sjukhuset (Carlén 2016). Akademiska sjukhuset har även egna brunnar inom sjukhusområdet för att säkra verksamhetens vattenförsörjning (Eriksson 2021).

Grundvattennivån i Uppsalaåsen regleras utefter en vattendom (Djurberg 2004). Vattendomar anger magnituden av tillåtet vattenuttag från en vattentäkt, med andra ord hur mycket grundvatten som ska finnas kvar i den samt tillföras (SKL 2019). Regelverken syftar till att

förhindra uppkomsten av skadliga grundvattensänkringar (Carlén 2016). Historiskt har grundvattennivån i Uppsala varierat av naturliga skäl, men även på grund av Uppsala Vattens dricksvattenproduktion (Wall & Sjöberg 2014; Uppsala Vatten u.å. b). Uttaget av grundvatten från åsen har lett till sänkta grundvattennivåer (Djurberg 2004). Från och med 1900-talet har grundvattennivån reglerats genom infiltration och uttag i Uppsalaåsen utefter vattendom M30079-04 som fastslagit att nivån ska ligga mellan +1,91 och +2,83 m (Wall & Sjöberg 2014).

3.2 Modellering av hydrogeologin

3.2.1 Modelleringsunderlag

Inom Akademiska sjukhusets område har främst jordsonderingar gjorts. Mätningar av grundvattennivåer har utförts av Uppsala Vatten i Stadsträdgården intill sjukhusområdet.

Konsultföretaget Bjerking har utfört många geotekniska uppdrag vid Akademiska Sjukhuset genom åren. Utifrån arkivstudier har 26 uppdrag erhållits, vilka bidrar med 474 borrhov innehållande information om de rådande markförhållanden vid sjukhusområdet. De sonderingar som gjorts i uppdragen vid Akademiska sjukhuset är skruvprovtagning, CPT-sondering, hejarsondering, vingborrsondering, viktsondering, trycksondering och jordbergsondering. Sonderingarnas egenskaper presenteras i Tabell 1. De borrhov som arkiverats i form av dwg-filer innehåller information om provets placering i x, y och z-led och innefattar koder som tolkar jordlagerföljden i punkten. Uppdragen är från en period mellan 1969 och 2020, vilket innebär att referenssystemen varierar samt om tolkning lagts in som kod eller ej. Målet är att alla borrhov ska vara i samma koordinat- och höjdsystem för att kunna kartläggas och modelleras i ett och samma system, något som justerats enligt beskrivning under avsnitt 3.2.2 *GeoSuite*.

3.2.2 GeoSuite

GeoSuite är en programvara som utvecklats av norska och svenska geotekniker från både den akademiska och offentliga sektorn i syfte att förenkla och effektivisera designberäkningar av geotekniska problem (Jostad *et al.* 2016). Programmet används för beräkning av en-, två- och tredimensionella system samt visualisering av geotekniska data i kombination med infrastruktur, såsom vägar och existerande byggnader (*ibid.*). Således, GeoSuite integrerar geotekniska indata, beräkningar och resultat i syfte att appliceras ibland annat bygg- och transportindustrin (*ibid.*). I detta projekt har GeoSuite använts för att tolka borrhovers jordlagerföljd samt ansätta samma koordinat- och höjdsystem till alla punkter; SWEREF 99 18 och RH2000. Tolkningarna har antingen gjorts okulärt i fält, vilket har registrerats som koder i GeoSuite, eller tolkats manuellt direkt i programvaran utefter kurvor som erhållits vid de olika sonderingarna. Till exempel, utifrån CPT-sonderingarna har bland annat mantelfriktion och portryck indikerat jordart då lägre friktionsvärden och högre portryck indikerar lera.

Justering av höjdsystem har gjorts i GeoSuite genom att alla borrhov mätta i UK72 placerades i ett särskilt urval. Till dessa utvalda borrhov adderades +2,25 m för att alla tolkningar samt markytan ska stämma med RH2000. Korrigering av borrhov som saknar xy-koordinater eller är ansatta med annat koordinatsystem än SWEREF 99 18 har gjorts med hjälp av programvaran AutoCAD. Kartor med borrhovprogram som krävde justering lades över en SWEREF 99 18-karta för att möjliggöra georeferering mellan de två. De nya koordinaterna synkroniserades med GeoSuite och borrhoven var nu i det önskade koordinatsystemet.

Efter att de drygt 450 borrhöjningar tolkats och justerats till samma höjd- och plansystem delades alla tolkningspunkter för fyllning, lera, friktionsjord, berg samt markyta upp i programvaran. Respektive jordskikt konverterats till dwg-filer, ett CAD-format vilka kan importeras till andra programvaror, exempelvis Topocad och Civil 3D. Denna typ av fil innehåller design data i två- eller tredimensionella system.

3.2.3 Topocad

Topocad är ett tredimensionellt CAD-system som används för att mäta, kartera och projektera utifrån jordens dimensioner och form (Ardal u.å.). Mätningar sparade i flertalet olika format kan importeras till Topocad (ibid.). I detta projekt har de bearbetade dwg-filerna från GeoSuite importerats till Topocad. Dessa filer innehåller information om jordlagernas nivå i respektive borrhöjning. I Topocad skapades en ny ritning för respektive jordlager; fyllning, lera, friktionsjord, berg och markyta där varje datapunkt placerades utefter RH2000 och SWEREF 99 18. Punkterna interpolerades utefter önskad distans med hjälp av Topocads terrängfunktion. Markytan interpolerades med avståndet 100 m och resterade jordskikt med 50 m. Dessa distanser valdes efter rådfrågan med geotekniker som undersökt marken vid Akademiska sjukhuset tidigare och har erfarenhet gällande vad som är rimligt utefter områdets rumsliga förändringar i marken. Väldigt små eller smala interpoleringsytor i utkanten av modellen togs bort för att skapa en tydlig modell då nästa steg var att utifrån interpoleringen rita upp nivåkurvor. Nivåkurvorna skapades i en ny ritning. I den nya ritningen användes ”skapa” under verktyget nivåkurvor där intervall i z-led väljs. I detta projekt har 1 eller 2 m valts mellan respektive kurva samt maximum (B spline) har applicerats för mjuka kurvlinjer. Filerna innehållande nivåkurvor för respektive jordlager och markyta importerades sedan in i programmet AutoCAD för att läggas över en primärkarta hämtad från Uppsala Kommuns kartportal. Lager i primärkartan rensades för att belysa de delar av kartan som är relevanta för projektet. Lager som behölls var bland annat byggnader och vägar, medan träd och brunnar var några av lagren som släcktes. De erhållna nivåkurvorna representerar jordskiktets underkant.

3.2.4 Civil 3D

En 3D-modell över Akademiska sjukhuset konstruerades i CAD-programvaran Civil 3D för att skapa tvärsnitt över jordlagerföljden vid de utvalda områdena 1–4. Detta gjordes genom att rita en planritning från GeoSuite över alla 474 tolkade borrhöjningar som kopplades till CAD-programmet. Samtliga borrhöjningar visualiserades i 3D och ytor mellan alla punkter skapades med interpolering. Detta innebär att markens alla skikt modellerades upp, det vill säga markyta, fyllning, lera, friktionsjord och berg. Med hjälp av en primärkarta togs de borrhöjningar som inte lokaliserades i område 1–4 bort och placering av sektioner ritades upp inom de utvalda områdena med hjälp av funktionen ”Generera sektion” under ”GS plan”. Tvärsnitt skapades sedan utifrån sektionerna med funktionen ”Terrängmodell Civil 3D”. Borrhöjningarna raderades från ritningarna av tvärsnitten i syfte att få sektionsritningar innehållande endast jordlagerföljd. I programvaran lades även grundvattnets trycknivå i medeltal från de senaste 20 åren in manuellt i alla tvärsnitt. De linjer som illustreras i tvärsnitten representerar jordlagrets underkant.

3.2.5 Grundvattennivåer

Uppsala Vatten använder Uppsalaåsen som vattentäkt och mäter därav grundvattentätheten kontinuerligt med hjälp av brunnar för att säkerställa att nivåerna hålls inom den rådande vattendomen. Det finns ett flertal brunnar i Stadsträdgården öster om sjukhusområdet och

Uppsala Vatten har delat data från en av deras mätbrunnar som underlag till detta examensarbete. Denna brunn är installerad med en nivågivare (tryckgivare) som mäter grundvattenytans position dagligen, vilket har resulterat i data från 1 januari 2000 till 24 februari 2021. För att få en översiktlig bild över hur grundvattnets nivå varierat under denna tidsperiod har medel-, maximum- och minimumvärden beräknats i Excel för respektive år samt medel-, maximum och minimumvärde för de 20 årens respektive värde sammantaget. Utifrån detta ges en förståelse över hur trycknivåerna varierat över åren, vilket ger underlag inför projektering av byggnation inom vattenskyddsområde; hur djupt kan schaktgrovar grävas och byggnader anläggas utan att tillstånd måste sökas.

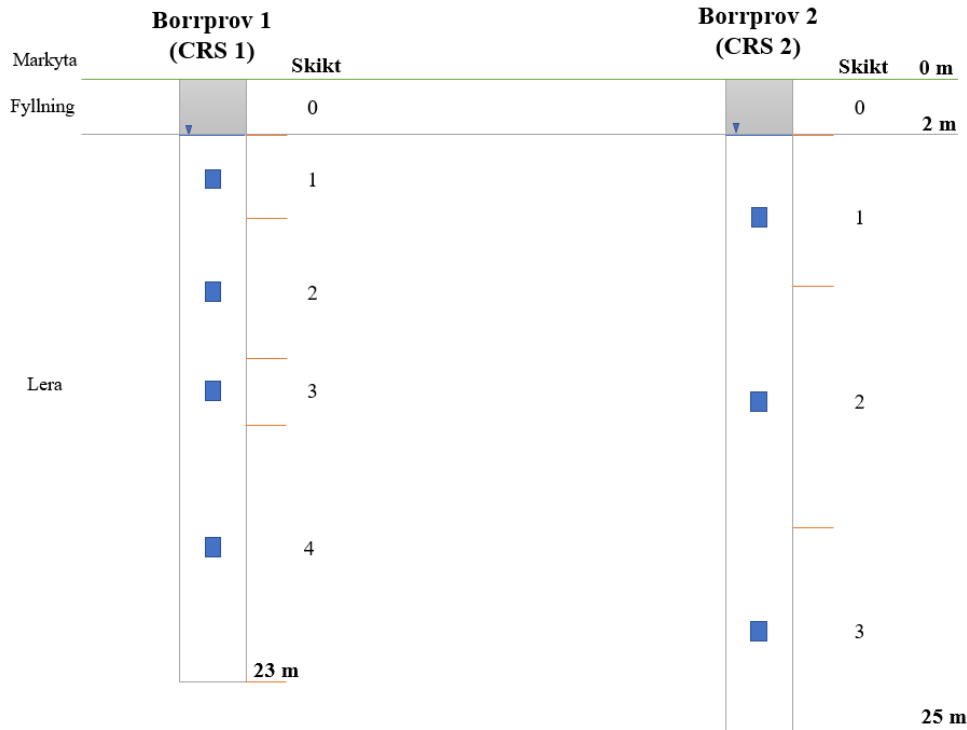
De värden som erhållits från brunnen i Stadsträdgården representerar även nivåerna i åsen under Akademiska sjukhuset då den hydrauliska gradienten kan antas vara försumbar däremellan (Beal 2021).

3.3 Sättningsberäkningar

Utifrån två CRS-undersökningar utförda av SWECO och WSP från sonderingar inrättade av Bjerking har sättningsbenägenhet och dess tid beräknas vid område 1. Dessa sonderingar har tagits intill parkeringshuset T3 i norr samt under T3.

3.3.1 CRS-försök

De två CRS-försöken delades in i delskikt. Delskikten ansattes så att samtliga jordprov erhållna med kolvar (illustrerat som blå rutor i Figur 7) hamnade mitt i delskiktet. Följaktligen delades CRS-försök 1 in i fyra skikt och CRS-försök 2 i tre skikt. Figur 7 illustrerar de två studerade borrhov som genomgått CRS-analys.



Figur 7. Schematisk illustration över skiktindelning av borrhov med CRS 1 och 2. De blå rutorna visar lokalisering av jordprov som genomgått CRS-analys. Grundvattenytans placering vid provtagning visas med blå triangel. Grå markering anger fyllnadsmaterial och resterade borrhov innehåller lera. Ej skalenlig figur.

Utifrån indelningen bestäms respektive skikts djup och mäktighet samt distans från grundvattenyta, vilket presenteras i Tabell 4.

Tabell 4. Skiktparametrar för CRS-försök 1 och 2.

CRS-försök	Skiktindelning	Djup till skikts mitt, z [m]	Tjocklek av skikt, Δz [m]	Djup från grundvattenyta, z_{gv} [m]
1	0 (Fyllning)	1	2	-1 (ovan grundvattenyta)
	1	3,5	3	1,5
	2	8	6	6
	3	12	2	10
	4	18	10	16
2	0 (Fyllning)	1	2	-1 (ovan grundvattenyta)
	1	4	4	2
	2	12	12	10
	3	20 (ej i skikts mitt)	5	18

Ett antal parametrar har erhållits från de jordprov som genomgått CRS-försök i laboratorium. Dessa värden är unika för respektive prov och ett antagande är att de råder för hela delskiktet de lokaliseras inom. De parametrar som erhöles med CRS-försök listas i Tabell 5.

Tabell 5. Data erhållet från CRS-försök.

Parameter	Enhet
Skjuvhållfasthet, τ_{fu}	kPa
M'	Enhetslös
M_L	kPa
σ'_c	kPa
σ'_L	kPa
Densitet, ρ	ton/m ³
Vattenkvot, W	%
Konflytgräns, W_L	%

Utöver dessa variabler beräknades ytterligare parametrar för att möjliggöra sättningsberäkningarna som beskrivs under avsnittet 2.4.3 CRS. Dessa presenteras i Tabell 6 samt hur de beräknas. Se A1 och A2 i Appendix för de exakta värden som erhållits vid CRS-försök samt de som härletts fram.

Tabell 6. Beräknad indata samt dess ekvationer inför sättningsberäkningar.

Parameter	Enhet	Ekvation
Egentyngd, γ	kN/m ³	(2)
Reduktionsfaktor, ν	Enhetslös	(13)
Korrigerad skjuvhållfasthet, $\tau_{fu,korr}$	kPa	(12)
M_0	kPa	(11)

Innan sättningkapaciteten vid dessa borrhov kunde beräknas behövde konsolideringstillståndet för respektive skikt identifieras. Detta gjordes genom att studera den effektiva spänningen före, σ'_0 , och efter pålastning, σ'_2 , gentemot respektive skikts CRS-resultat för konsolideringstryck, σ'_c , och gränstryck, σ'_L . Konsolideringstillståndet har utvärderats utefter Figur 3 på sida 18, avsnitt 2.4.3 CRS.

De utvalda områdena har varierande konkreta planer för framtida byggnation eller ombyggnation. Därav har tre typer av hypotetiska byggnationer valts för att utvärdera markens sättningsbenägenhet;

1. Rektangulär byggnation med en area på 5 x 10 m.
2. Byggnad med "oändligt" lång last, men med en bredd på 5 m.
3. Byggnad med "oändligt" lång och bred last.

De tre olika scenariona har beräknats med laster, q , på 10 kPa, 20 kPa och 30 kPa, vilket överslagsmässigt motsvarar byggnader med en, två, respektive tre våningar (Håkansson 2021).

Utöver detta är de flesta variabler kända för att genomföra sättningsberäkningarna. De antaganden som varit nödvändiga är att portrycket, u , är noll i skiktet med fyllning då det antas vara ett väl-dränerande lager samt att fyllnadsmaterialets egentyngd är 18 kPa då det är standard vid geotekniska undersökningar.

Med samtliga värden och antaganden har sättningkapaciteten av dessa borrhov innehållande lera beräknats utefter de beräkningssteg som visas i Tabell 7, se kolumn från vänster till höger.

Tabell 7. Beräkningssteg för beräkning av sättningsbenägenhet.

Sättningsberäkning									
Parameter	Ursprungs - tryck			På- lastning	Sluttryck	Kon- solidering	Töjning	Komp- ression	Sättning
Symbol och enhet	σ_0 [kPa]	u [kPa]	σ'_0 [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa]	σ'_2 [kPa]	Tillstånd, se avsnitt 2.4.3 CRS.	ε	δ [m]	Sättning [cm]
Ekvation	(1)	(4)	(3)	(7), (8) eller (9)	$= \sigma'_0$ $+ \Delta\sigma'$	-	Ekvationer i Tabell 3.	(20)	$= 100 \times \delta$

3.3.2 Tid till totalsättning

Tidsförlopp av sättning beräknades med hjälp av ekvation (21). Marken vid Akademiska sjukhuset antas ha dubbelsidig dränering eftersom porvattnet kan flöda både till markytan och underliggande skikt. Detta innebär att dräneringsfall 1 studerades i ett nomogram över konsolideringsgrad, U , och tidsfaktor, T_v . Då tiden för sättning vid 50% och 95% söks ansattes U som 0,5 och 0,95, vilket ger tidsfaktorerna 0,2 respektive 1,6 utifrån nomogrammet beskrivet under avsnitt 2.4.3 CRS. För att använda (21) behöver konsolideringskoefficienten, c_v , ansättas. En kurva över c_v har erhållits för respektive pålastat jordprov i vardera CRS-försök. Koefficienten ansattes till det minsta erhållna värdet från CRS-försöken i syfte att undersöka "worst case" scenario, vilket benämns $c_{v,min}$. Ju mindre koefficienten är, desto långsammare sker sättningen enligt (21). Parametern c_v vid effektivt vertikalt tryck, σ'_v , på 80 kPa ansattes även då det var överslagsmässigt snittvärdet av de hypotetiska pålastningar som undersöktes. Samtliga konsolideringskoefficienter för respektive skikt viktades därefter utefter storleken av delskikten för att erhålla ett värde som representerade hela jordlagerföljden. Det viktade värdet för $c_{v,min}$ samt c_v vid 80 kPa användes vid beräkning av sättningarnas tidsförlopp. c_v är en temperaturberoende variabel och kan därav kräva korrigering. I geotekniska projekt antas det generellt att marktemperaturen är cirka 7 °C. Dock, laborationsförsök görs ofta i rumstemperatur vid cirka 20 °C. De CRS-försök som ger underlag för detta examensarbete temperaturkorrigerades XSJSWU från rums- till marktemperatur enligt Svenska Institutet för Standarder (SIS) om behöver därav inte korrigeras.

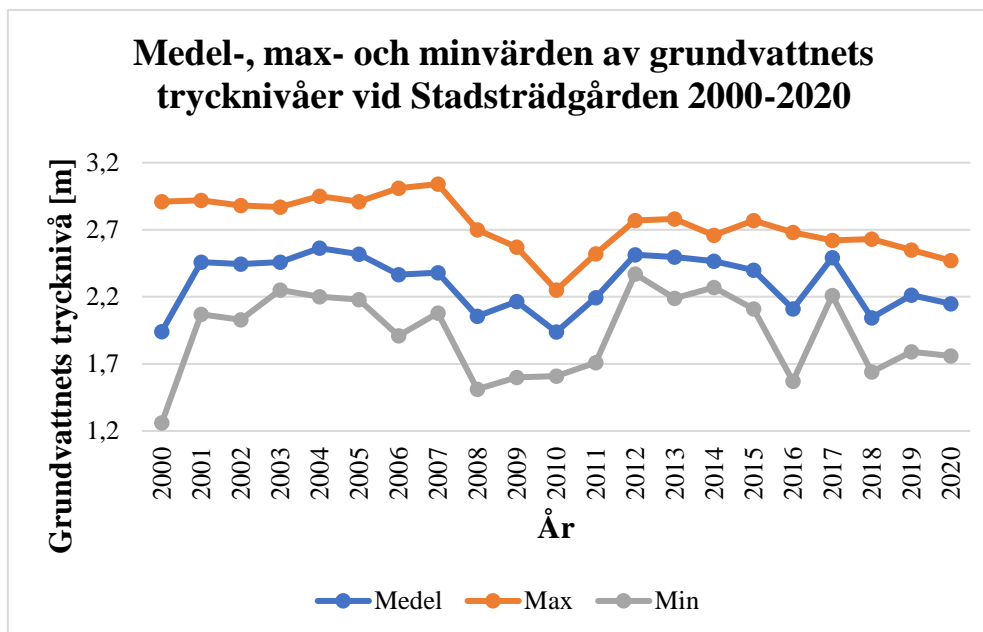
4. Resultat

4.1 Kartläggning av markskikt och grundvatten

I detta avsnitt presenteras de resultat som erhållits från modellering av markförhållanden vid Akademiska sjukhuset samt grundvattennivåer från dagliga data de senaste 20 åren.

4.1.1 Grundvattennivå

Utifrån Uppsala Vattens dagliga mätningar av grundvattennivåer i Stadsträdgården mellan åren 2000 och 2020 beräknades årliga medel-, max- och minvärden av grundvattnets trycknivåer i Excel. Dessa resultat illustreras i Figur 8 i höjdsystemet RH2000. Resultaten visar att grundvattnet hålls inom den rådande vattendomen och möjliggör vidare undersökning av distans från grundvattnets trycknivå till markyta. Detta ger underlag till projektering och tillståndsansökan inom primär skyddszon.



Figur 8. Årsmedelvärden av grundvattnets trycknivåer från brunn i Stadsträdgården i RH2000.

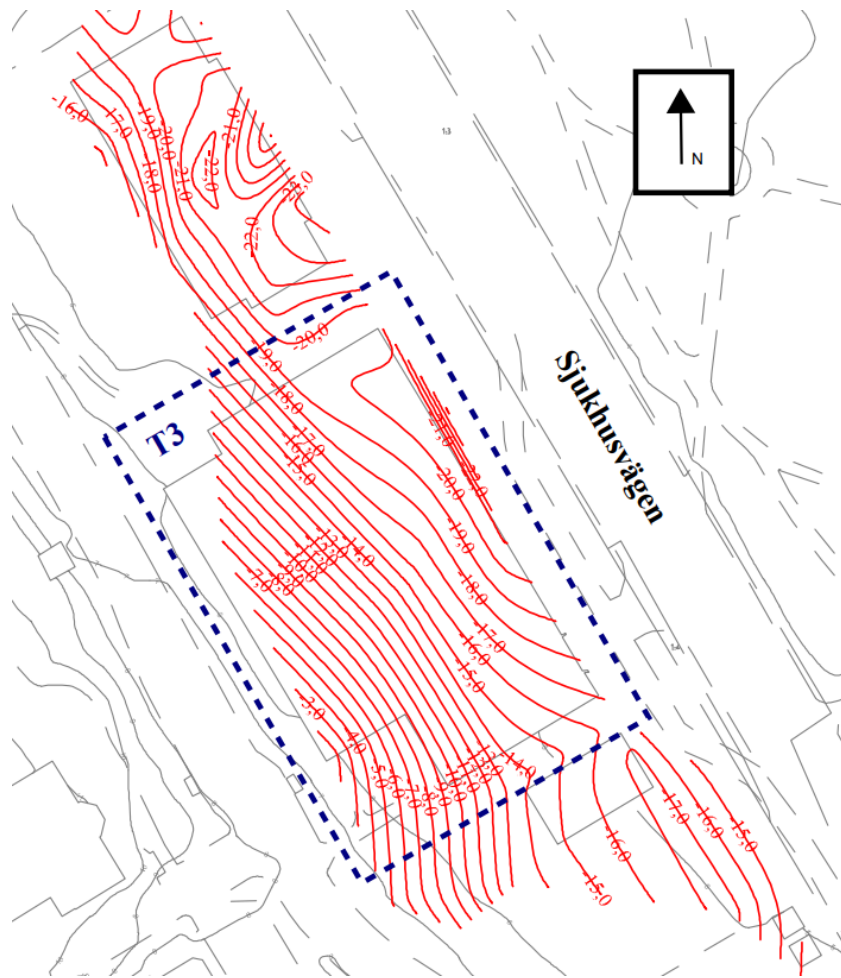
Det totala medel-, max- och minvärde för de årliga värden mellan 2000 och 2020 presenteras i Tabell 8.

Tabell 8. Medel-, max- och minvärden av årsvärden från respektive medel-, max- och minvärde över åren 2000 till 2020 baserat på brunn i Stadsträdgården.

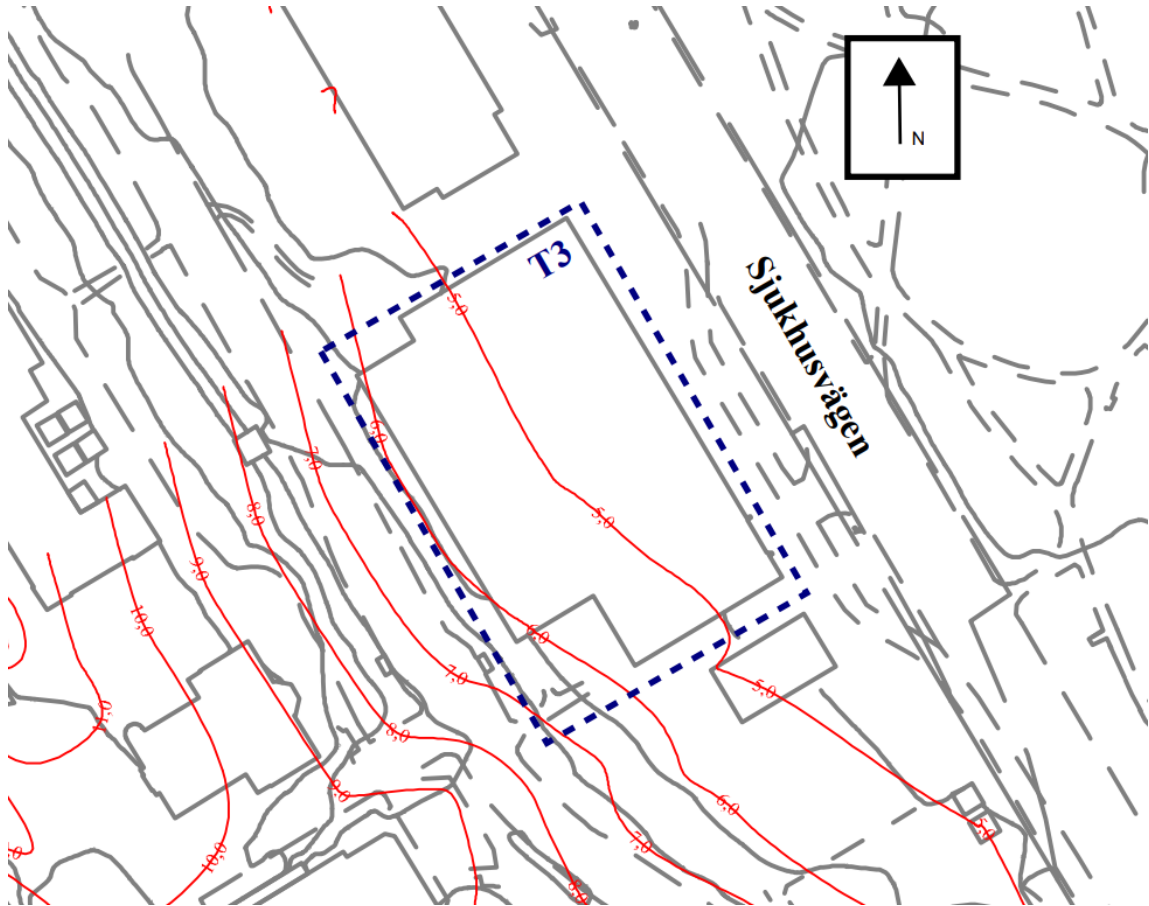
År 2000–2020	Medelvärde	Maxvärde	Minvärde
Grundvattnets trycknivå [m] (RH2000)	2,30	2,74	1,92

4.1.2 Jordlager och tvärsnitt

I programvaran Topocad interpolerades sonderingar som tolkats i GeoSuite i syfte att kartlägga nivåerna av respektive studerat jordskikt; markyta, fyllnadsmaterial, lera, friktionsjord och berg. Nivåkurvorna placerades ovan en primärkarta i höjdsystemet RH2000, se Figur A3-A8 i *Appendix* för samtliga kartor med nivåkurvor (öppnas helst i Bluebeam eller CAD-program för bäst upplösning). Kartorna ger en överblick över vart underlag finns tillgängligt för markutredning samt hur djupt respektive skikt befinner sig. Figur 9 och 10 illustrerar närbilder av nivåkurvor vid parkeringshuset T3. Figur 9 visar underkanten av brant djupgående lera i riktning av Sjukhusvägen. Figur 10 visar markytan över samma plats, vilken även sluttar mot Sjukhusvägen om än i mindre brant förled.

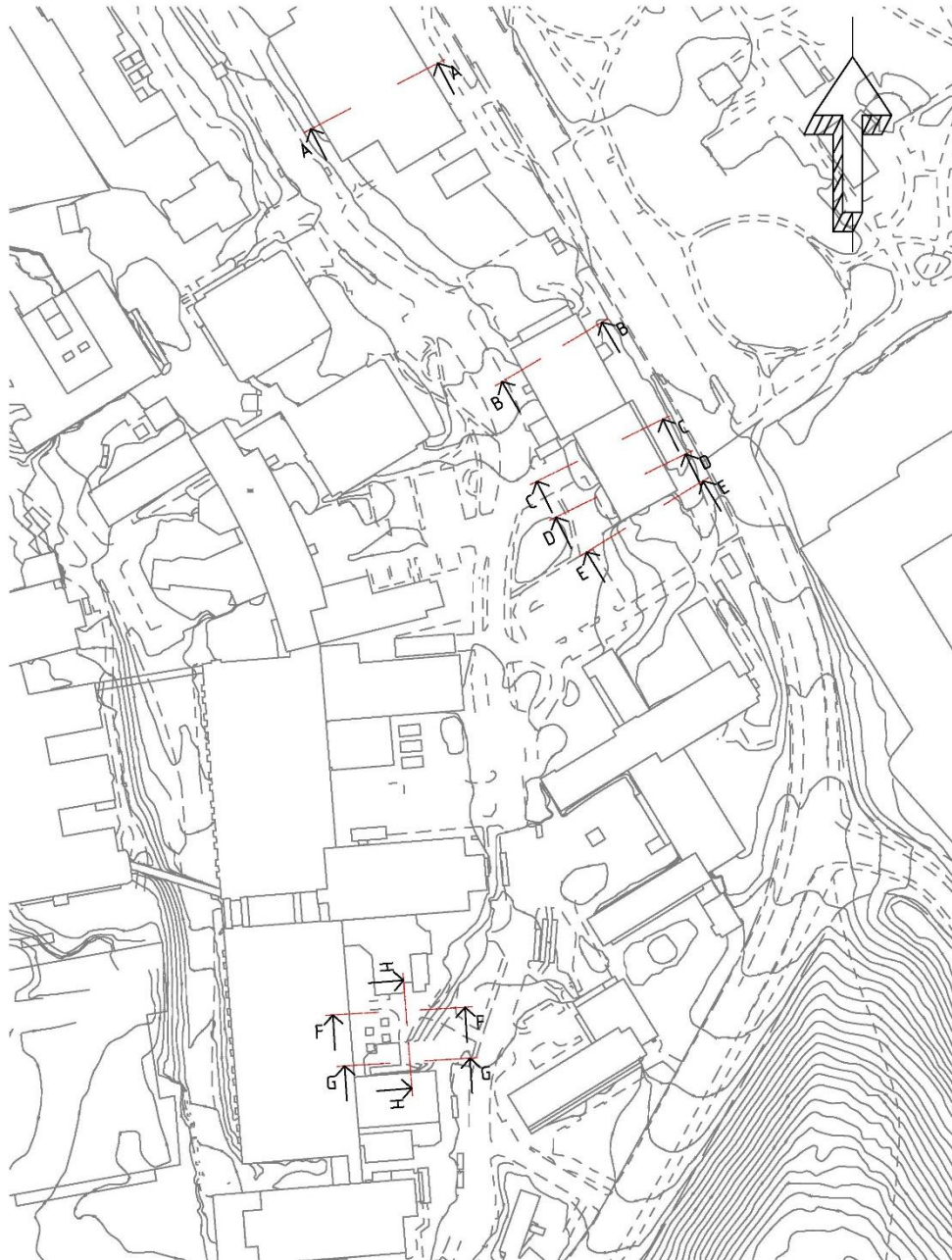


Figur 9. Nivåkurvor över lerans underkant vid parkeringshus T3 (området 1) i RH2000.



Figur 10. Nivåkurvor över markytan vid parkeringshus T3 (område 1) i RH2000.

Sju sektionssritningar gjordes vid de utvalda områdena där dokumenterade sonderingar finns; område 1, 2 och 4. Tvärsnitten har erhållits utifrån interpolering mellan borrhöjningar i Civil 3D. Figur 11 visar vart sektionerna placerats; tvärsöver parkeringshus T3 (område 1), produktionsköket (område 2) och cyklotronbyggnadens planerade plats (område 4). Då det inte finns arkiverade sonderingar vid NOP-komplexet (område 3) kunde interpolering inte göras vid området och inga tvärsnitt kunde arbetas fram.

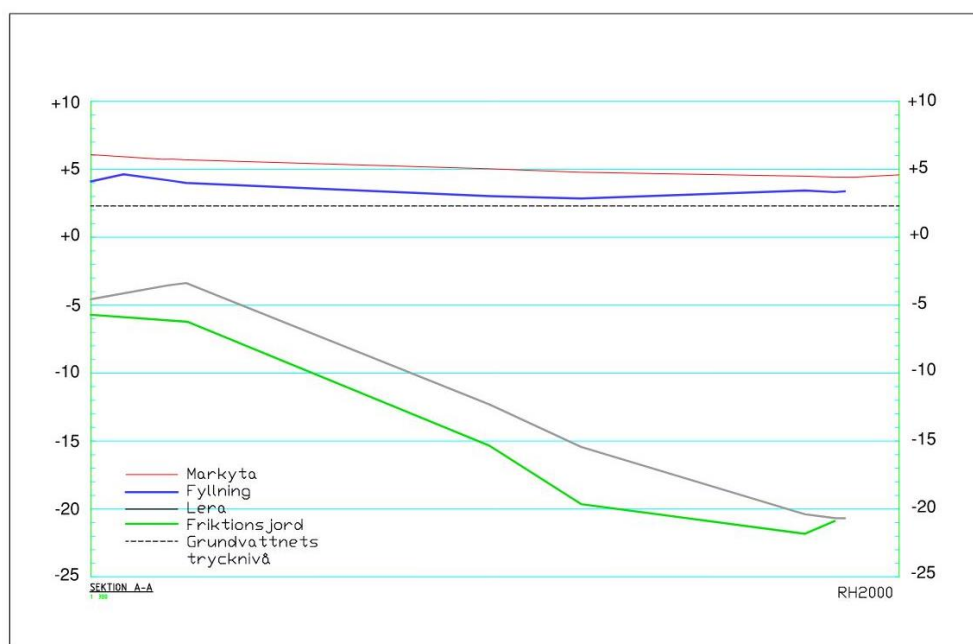


Figur 11. Placering av sektionssritningar. A-A inom område 1. B-B, C-C, D-D och E-E inom område 2. F-F, G-G och H-H inom område 4.

Jordlagerföljden som interpolerats i Civil 3D och ger grund till 3D-modellen innefattar markyta, fyllning, lera, friktionsjord och berg. Skiktlinjerna representerar jordlagrens underkant. Detta innebär att allt ovan linjen innefattar den jordart som linjen företräder. Beroende på sonderingstyp och lokalisering innefattar inte alla sektioner alla fem jordartsklassificeringar. Sektionsritningarna innehåller även en linje som representerar medelvärdet av grundvattnets trycknivå de senaste 20 åren, se Tabell 8, vilket har lagts till manuellt. Figur 12–19 visar tvärsnitt vid område 1, 2 och 4. Figurerna är ej skalensliga i rapporten.

Område 1

Figur 12 påvisar att lermäktigheten under parkeringshuset T3 uppgår till drygt 20 m. Denna mäktighet indikerar större sättningsrisker över lång tid om ingen grundläggning implementeras. Följaktligen är djupgrundläggning troligtvis lämpligast för att säkra ett stabilt bygge. Grundvattnets trycknivå i medeltal från de senaste 20 åren ligger kring tre m under mark, vilket indikerar att tillstånd inom primär skyddszon måste högt sannolikt sökas vid minsta grävdjup.

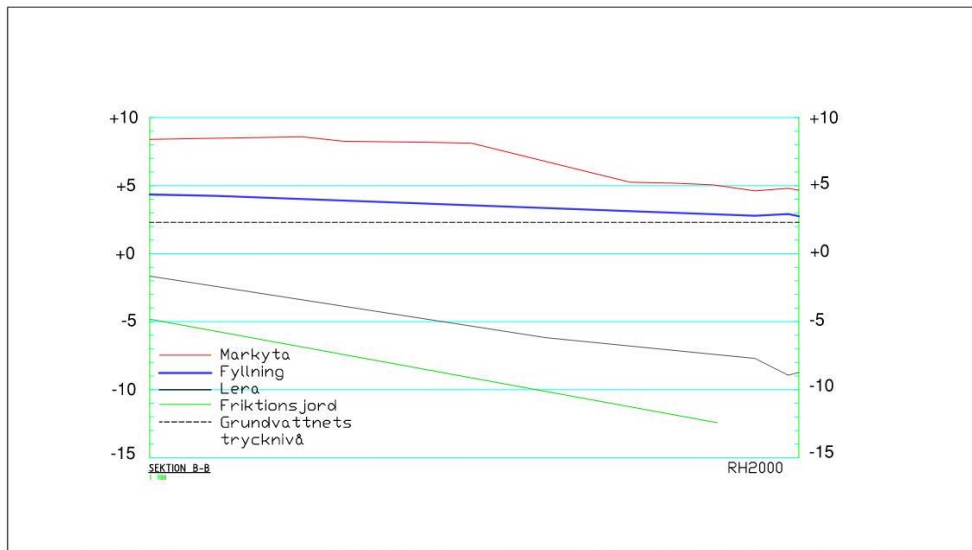


Figur 12. Sektion A-A. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid T3 (område 1). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.

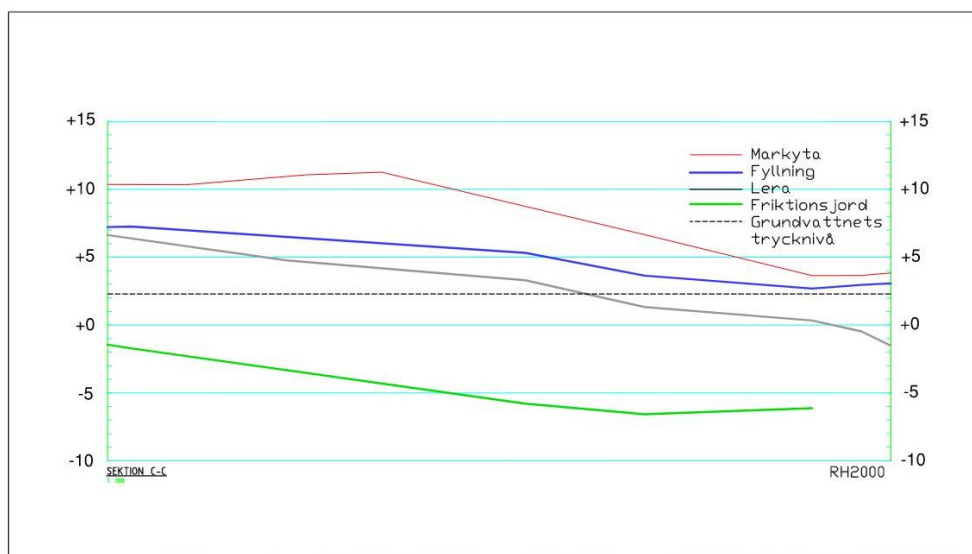
Område 2

Figur 13 visar ett lerlager på cirka 15 m i den norra delen av produktionsköket, medan Figur 14–16 visar knappa lerlager i områdets södra del. Detta innebär en viss sättningsrisk i områdets norra del, vilket kan kräva djupgrundläggning. I tvärsnitten illustrerade i Figur 15 och 16 korsas skiktlinjer. Överlappningen tyder på att interpoleringen vid dessa punkter troligtvis inte lett till verklighetstroga resultat då leran i regel lokaliseras under fyllnadsmaterial som anläggs av människan vid byggnation. Friktionsjordens underkant har förmodligen inte illustrerats korrekt i tvärsnitten då sonderingarna oftast inte tagit hänsyn till

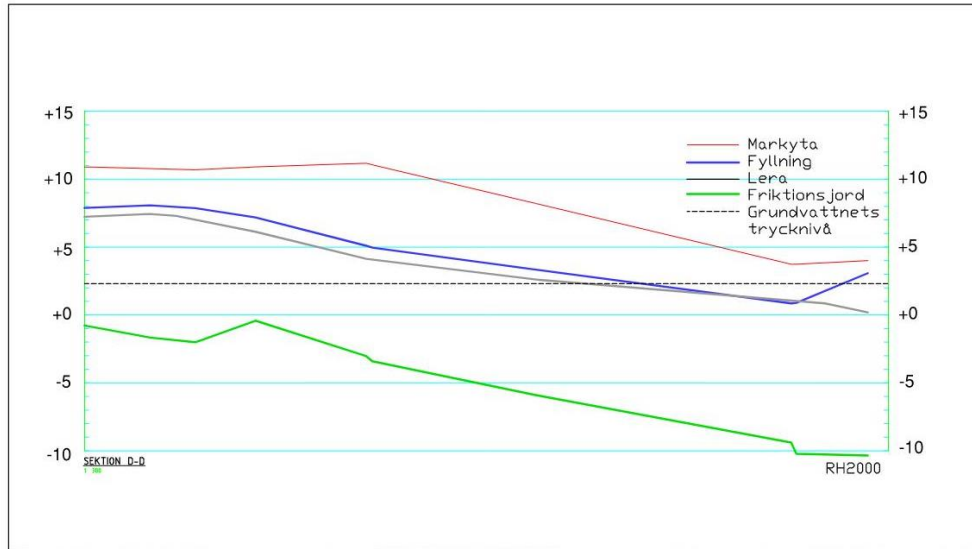
mer än att studera lerans mäktighet. Däremot är lerans underkant densamma som friktionsjordens överkant. Grundvattnets trycknivå avläses ligga relativt ytligt och tillstånd för byggnation inom primär skyddszon kommer troligtvis behöva sökas.



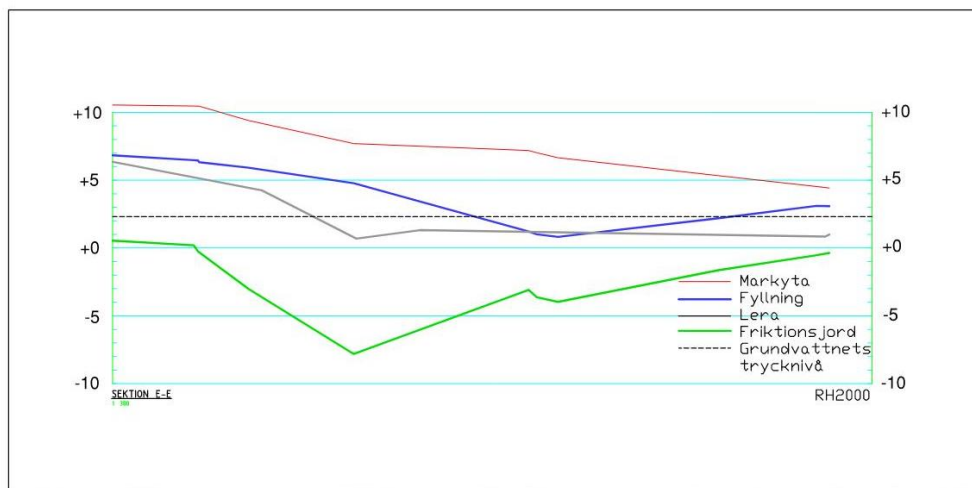
Figur 13. Sektion B-B. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid produktionsköket (område 2). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.



Figur 14. Sektion C-C. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid produktionsköket (område 2). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.



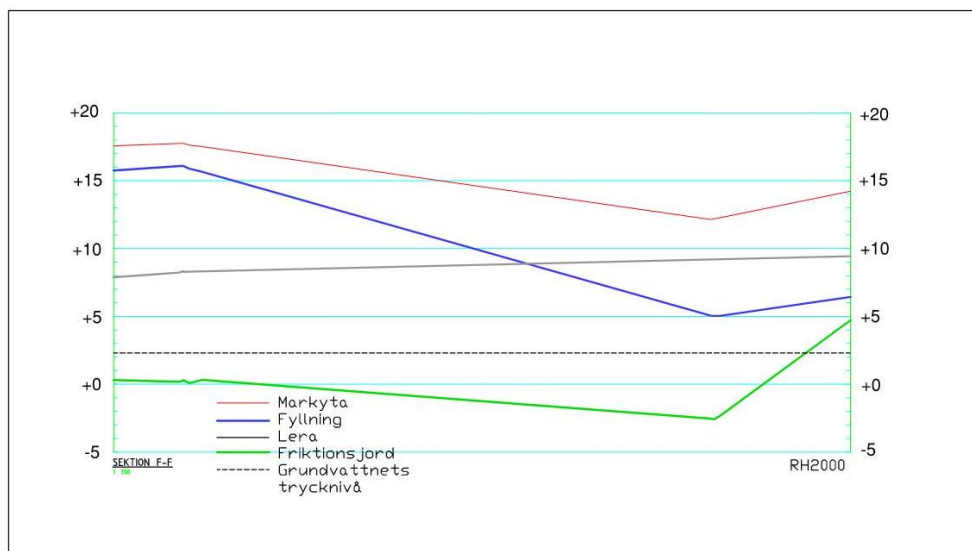
Figur 15. Sektion D-D. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid produktionsköket (område 2). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.



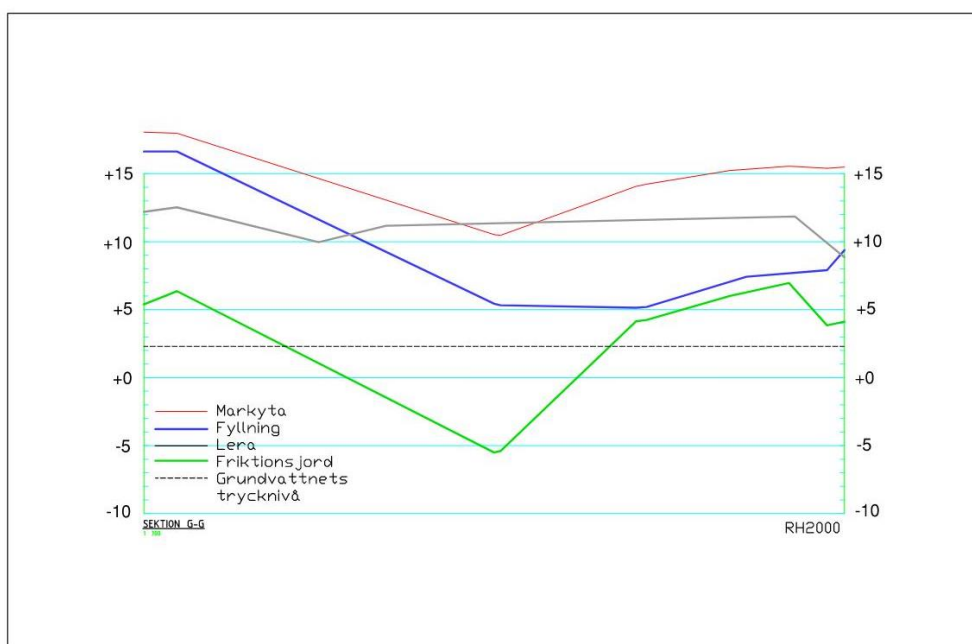
Figur 16. Sektion E-E. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid produktionsköket (område 2). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.

Område 4

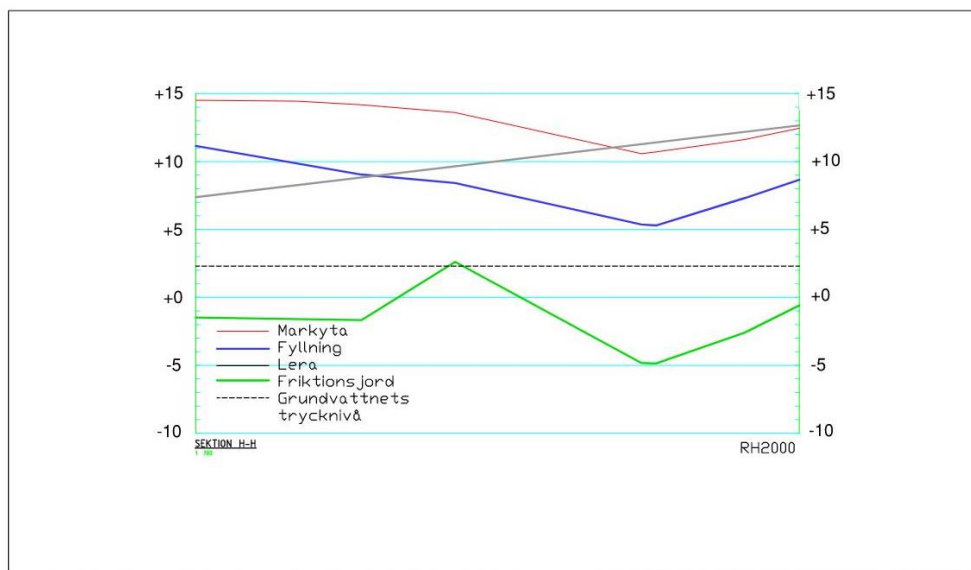
Tvärsnitten erhållna från område 4, se Figur 17–19, visar en kuperad markyta och att grundvattnets trycknivå i medeltal ligger djupare än 3 m ner i marken. Problematiken kring överlappande linjer av fyllnadsmaterial och lera har även uppstått vid område 4, likt område 2. Detta har resulterat i otydliga resultat över lermäktigheten och grundläggningsmetod kan inte rekommenderas.



Figur 17. Sektion F-F. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid nya cyklotronbyggnaden (område 4). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.



Figur 18. Sektion G-G. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid nya cyklotronbyggnaden (område 4). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.



Figur 19. Sektion H-H. Tvärsnitt över jordlagerföljd vid nya cyklotronbyggnaden (område 4). Linjerna över markskikten representerar lagrets underkant. Grundvattenytans trycknivå baseras på ett medelvärde över medelvärden för åren mellan 2000 och 2020.

4.2 Sättningsberäkningar

Sättningsbenägenhet beräknades utifrån två olika CRS-försök som gjorts i och i närheten av område 1. Tre typer av hypotetiska byggnationer med lasterna 10 kPa, 20 kPa och 30 kPa har studerats för att utvärdera markens sättningskapacitet. De tre hypotetiska byggnationerna med lasten 30 kPa för de två olika CRS-försöken presenteras under rubrikerna 4.2.1 och 4.2.2. De resterande resultaten presenteras i *Appendix*.

4.2.1 CRS-försök 1

Rektangulär last

Den första hypotetiska byggnaden representerar ett mindre hus med dimensionerna 5 x 10 m. Tabell 9 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (7).

Tabell 9. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från rektangulär last då $b = 5$ m och $l = 10$ m vid CRS-försök 1.

q [kPa]	Q = qbl [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, z = 1 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 z = 3,5 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 z = 8 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 z = 12 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 4 z = 18 m
10	500	7,58	4,36	2,14	1,34	0,78
20	1000	15,15	8,71	4,27	2,67	1,55
30	1500	22,73	13,07	6,41	4,01	2,33

Tabell 10 visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 10. Sättning för respektive markskikt då $q = 30$ kPa för rektangulär last ($b = 5$ m och $l = 10$ m) samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	40,73	56,44	70,41	86,96	122,89
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,015	0,0076	0,0048	0,0018
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0441	0,0456	0,0096	0,0176
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	4,41	4,56	0,96	1,76

”Oändligt” lång last

Den andra hypotetiska byggnaden representerar en större anläggning med en bredd på 10 m. Tabell 11 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (8).

Tabell 11. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från ”oändligt” lång last då $b = 5$ m vid CRS-försök 1.

q [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, z = 1 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 z = 3,5 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 z = 8 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 z = 12 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 4 z = 18 m
10	8,33	5,88	3,85	2,94	2,17
20	16,67	11,76	7,69	5,88	4,35
30	25,00	17,65	11,54	8,82	6,52

Tabell 12 visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 12. Sättning för respektive markskikt då $q = 30$ kPa för ”oändligt” lång last med $b = 5$ m samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	43,00	61,01	75,53	91,78	127,09
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,020	0,014	0,0105	0,0049
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0595	0,0821	0,021	0,0493
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	5,95	8,21	2,10	4,93

”Oändligt” lång och bred last

Den tredje hypotetiska byggnaden med ”oändligt” lång och bred last representerar en större anläggning, vilket troligtvis är mest likt de stora komplexen vid Akademiska sjukhuset. Tabell 13 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (9).

Tabell 13. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från ”oändligt” lång och bred last vid CRS-försök 1.

q [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, $z = 1$ m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 $z = 3,5$ m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 $z = 8$ m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 $z = 12$ m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 4 $z = 18$ m
10	10	10	10	10	10
20	20	20	20	20	20
30	30	30	30	30	30

Tabell 14 visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 14. Sättning för respektive markskikt då $q = 30$ kPa för "oändligt" lång och bred last samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	48,00	73,37	94,00	112,95	150,56
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC+NC	OC+NC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,034	0,036	0,035	0,023
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,1012	0,2148	0,071	0,2269
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	10,12	21,48	7,10	22,69

Totala sättningar för respektive scenario och q

Den totala sättningen av marken vid CRS-försök 1 presenteras i Tabell 15, vilket har erhållits genom att respektive jordskikts totala sättning har adderats.

Tabell 15. Total sättning vid olika typer av belastning för de tre olika byggnationsdimensionerna vid 23 m lera.

Belastning	Totalsättning		
	$q = 10$ kPa	$q = 20$ kPa	$q = 30$ kPa
Rektangulär last	3,90 cm	7,79 cm	11,69 cm
"Oändligt" lång last	7,066 cm	14,13 cm	21,20 cm
"Oändligt" lång och bred last	20,43 cm	40,86 cm	61,39 cm

4.2.2 CRS-försök 2

Rektangulär last

Den första hypotetiska byggnaden representerar ett mindre hus med dimensionerna 5 x 10 m. Tabell 16 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (7).

Tabell 16. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från rektangulär last då $b = 5$ m och $l = 10$ m vid CRS-försök 2.

q [kPa]	Q = qbl [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, z = 1 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 z = 4 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 z = 12 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 z = 20 m
10	500	7,58	3,97	1,34	0,67
20	1000	15,15	7,94	2,67	1,33
30	1500	22,73	11,90	4,01	2,00

Tabell visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 17. Sättning för respektive markskikt då $q = 30$ kPa för rektangulär last ($b = 5$ m och $l = 10$ m) samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	40,73	56,94	84,61	130,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,018	0,0041	0,0017
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0701	0,0493	0,0085
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	7,01	4,93	0,85

”Oändligt” lång last

Den andra hypotetiska byggnaden representerar en större anläggning med en bredd på 10 m. Tabell 18 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (8).

Tabell 18. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från "oändligt" lång last då $b = 5$ m vid CRS-försök 2.

q [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, z = 1 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 z = 3,5 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 z = 8 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 z = 12 m
10	8,33	5,56	2,94	2,00
20	16,67	11,11	5,88	4,00
30	25,00	16,67	8,82	6,00

Tabell 19 visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 19. Sättning för respektive markskikt då $q = 30$ kPa för "oändligt" lång last med $b = 5$ m samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	24,67	56,15	86,48	132,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC+NC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,025	0,00904	0,0051
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0986	0,1085	0,0256
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	9,86	10,85	2,56

”Oändligt” lång och bred last

Den tredje hypotetiska byggnaden med ”oändligt” lång och bred last representerar en större anläggning, vilket troligtvis är mest likt de stora komplexen vid Akademiska sjukhuset. Tabell 20 visar den spänning som tillförs från denna byggnation på respektive skikt, vilket har beräknats med (9).

Tabell 20. Beräkning av tillförd spänning på olika jordskikt från ”oändligt” lång och bred last vid CRS-försök 2.

q [kPa]	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 0, z = 1 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 1 z = 3,5 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 2 z = 8 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 3 z = 12 m	$\Delta\sigma'$ [kPa] Skikt 4 z = 18 m
10	10	10	10	10	10
20	20	20	20	20	20
30	30	30	30	30	30

Tabell 21 visar magnituden av förväntad sättning vid denna dimensionering av byggnad då q är 30 kPa. Resultaten för övriga laster finns under avsnittet *Appendix*. Ett antal parametrar behövde även erhållas för att utföra sättningsberäkningen, vilka presenteras i samma tabell.

Tabell 21. Sättning för respektive markskikt då q = 30 kPa för ”oändligt” lång och bred last samt väsentliga parametrar.

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	28,00	55,04	90,60	138,82
Konsolideringavsikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC+NC	OC+NC	OC+NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,047	0,031	0,025
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,1878	0,3721	0,1263
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	18,78	37,21	12,63

Totala sättningar för respektive scenario och q

Den totala sättningen av marken vid CRS-försök 2 presenteras i Tabell 22, vilket har erhållits genom att respektive jordskikts totala sättning har adderats.

Tabell 22. Total sättning vid olika typer av belastning för de tre olika byggnationsdimensionerna vid 25 m lera.

Belastning	Totalsättning		
	$q = 10 \text{ kPa}$	$q = 20 \text{ kPa}$	$q = 30 \text{ kPa}$
Rektangulär last	4,26 cm	8,53 cm	12,79 cm
”Oändligt” lång last	7,74 cm	15,48 cm	23,27 cm
”Oändligt” lång och bred last	22,45 cm	45,23 cm	68,62 cm

4.2.3 Sättningstider

I detta examensarbete har tiden vid hälften av sättningens infinnande samt totalsättningen beräknats utifrån de två CRS-försöken.

Konsolideringskoefficienten, vilken krävs för att beräkna en sättnings tidsförlopp, har viktats utefter storleken på de skikt som markprofilen delats in. I Tabell 23 visas viktningen för den minsta konsolideringskoefficienten, $c_{v,min}$, samt för c_v vid vertikal effektivspänning, $\Delta\sigma'$, på 80 kPa för CRS-försök 1. Tabell 24 visar resultatet för CRS-försök 2.

Tabell 23. Viktat $c_{v,min}$ samt viktat c_v vid $\Delta\sigma' = 80 \text{ kPa}$ för hela jordprofilen, CRS-försök 1.

CRS 1	$c_{v,min} [\text{m/s}^2]$	Förhållande	Viktat $c_{v,min} [\text{m/s}^2]$	Sammanlagt viktat $c_{v,min} [\text{m/s}^2]$
Skikt 1	$4,3 \cdot 10^{-9}$	1/7	$6,14 \cdot 10^{-10}$	$2,14 \cdot 10^{-8}$
Skikt 2	$1,2 \cdot 10^{-8}$	2/7	$3,43 \cdot 10^{-9}$	
Skikt 3	$3,2 \cdot 10^{-8}$	2/21	$3,05 \cdot 10^{-9}$	
Skikt 4	$3,00 \cdot 10^{-8}$	10/21	$1,43 \cdot 10^{-8}$	
CRS 1	$c_v [\text{m/s}^2]$	Förhållande	Viktat $c_v [\text{m/s}^2]$	Sammanlagt viktat $c_v [\text{m/s}^2]$
Skikt 1	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1/7	$2,14 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-7}$
Skikt 2	$1,3 \cdot 10^{-7}$	2/7	$3,71 \cdot 10^{-8}$	
Skikt 3	$1,85 \cdot 10^{-6}$	2/21	$1,76 \cdot 10^{-7}$	
Skikt 4	$1,0 \cdot 10^{-7}$	10/21	$4,76 \cdot 10^{-8}$	

Tabell 24. Viktat $c_{v,min}$ samt viktat c_v vid $\Delta\sigma' = 80kPa$ för hela jordprofilen, CRS-försök 2.

CRS 2	$c_{v,min}$ [m/s^2]	Förhållande	Viktat $c_{v,min}$ [m/s^2]	Sammanlagt viktat $c_{v,min}$ [m/s^2]
Skikt 1	$7,8 \cdot 10^{-9}$	1/5	$1,49 \cdot 10^{-9}$	$2,88 \cdot 10^{-8}$
Skikt 2	$3,7 \cdot 10^{-8}$	4/7	$2,11 \cdot 10^{-8}$	
Skikt 3	$2,6 \cdot 10^{-8}$	5/21	$6,19 \cdot 10^{-9}$	
CRS 2	c_v [m/s^2]	Förhållande	Viktat c_v [m/s^2]	Sammanlagt viktat c_v [m/s^2]
Skikt 1	$1,85 \cdot 10^{-7}$	1/5	$3,52 \cdot 10^{-8}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$
Skikt 2	$1,9 \cdot 10^{-6}$	4/7	$1,09 \cdot 10^{-6}$	
Skikt 3	$1,95 \cdot 10^{-6}$	5/21	$4,64 \cdot 10^{-7}$	

Därefter beräknades tiden med respektive c_v och för respektive CRS-försök vid konsolideringsgrad 0,5 och 0,95. Detta presenteras i Tabell 25.

Tabell 25. Tidsberäkning av sättningförlopp med respektive c_v för CRS-försök 1 och 2.

Tidsberäkning		Tid, t [år]			
Konsolideringsgrad, U	Tidsfaktor, T_v	CRS 1		CRS 2	
		$c_{v,min}$	c_v	$c_{v,min}$	c_v
0,5	0,2	32,7	2,48	24,3	0,44 (drygt 5 månader)
0,95	1,3	213	16,1	158	2,87

5. Diskussion

5.1 Grundvatten

Vattentäkten i Uppsalaåsen regleras och kontrolleras utefter en vattendom då den nyttjas för Uppsalas vattenförsörjning (Wall & Sjöberg 2014). Det var därav väntat att grundvattnets trycknivåer hålls inom domens bestämda intervall, vilket resultaten bekräftade, se Figur 8. Då vattendomen än råder kan det förväntas att nivåerna kommer lokaliseras kring de erhållna resultaten även framåt. Stabila trycknivåer av grundvattnet, det vill säga inga fluktuationer i grundvattennivå, innebär att falsk kohesion inte väntas uppstå. Framtida klimatförändringar bör således inte påverka grundvattennivåerna vid Akademiska sjukhuset så länge den hydrologiska cykeln inte blir förändrad till en extrem grad som är svår att reglera med hjälp av exempelvis konstjord infiltrering.

Uppsala Vattens brunn i Stadsträdgården intill sjukhusområdet kan antas representera grundvattnets trycknivå under Akademiska sjukhuset då den hydrauliska gradienten bör vara mycket låg mellan brunnarna och sjukhuset. Eftersom grundvattnet strömmar in och ned mot åsen bör grundvattenytan eventuellt vara något lägre under sjukhuset. Det hade eventuellt varit fördelaktigt att interpolera mellan fler brunnar i området för att få en mer detaljerad grundvattenbild. Resultaten hade varit ännu säkrare om mätningar från brunnar inom sjukhusområdet registrerats då det hade gett direkta resultat för åsens hydrologi. Detta kräver dock att nivåmätare implementeras i området och att kontinuerliga data registreras. De

erhållna resultaten i detta projekt kan anses utgöra en god överblick av grundvattenbilden vid Akademiska sjukhuset.

Planering av byggnationer inom skyddsområdet underlättas av att grundvattennivåerna inte har fluktuerat mer än 1 till 2 m de senaste 20 åren. Dessa resultat ger dock inte svar på huruvida om tillstånd bör sökas eller om undantag råder. Detta beror på hur mycket som behöver schaktas inför byggnation eller vilken grundläggningen som implementeras. Om djupgrundläggning ska appliceras, exempelvis pålning, är det troligt att tillstånd kommer krävas då det kan förändra grundvattnets flöde, om än temporärt under byggnation. Grundvattnets trycknivå ligger relativt ytligt och inom primära skyddszoner får byggnation inte nå under minst 3 m från den högsta grundvattenytan (03FS 1990:1). Om området där byggnation planeras har en grundvattennivå nära markytan rekommenderas ytterligare undersökning med mätningar vid den tilltänkta platsen.

5.2 Jordskikt och tvärsnitt

Vid de områden som pekats ut för ny- eller ombyggnation har tvärsnitt erhållits utifrån 3D-modell konstruerad i Civil 3D. Sektionsritningar kunde tas fram för område 1, 2 och 4, dock inte vid område 3 då inga sonderingar förekommit. De provtagningar som gett grund till detta examensarbete har utförts mellan 1969 och 2021, vilket betyder att sonderingarna har gjorts vid olika tillfällen och med varierande syften. Således, de nästintill 500 borrhov som genererats vid Akademiska sjukhusets har under denna tid genomförts med olika typer av sonderingar och till skilda djupt ned i marken. De sonderingsmetoder som gjorts i sjukhusområdet har inte haft likvärdig känslighet för detektion av jordövergångar eller förmåga att tränga ned i marken. Generellt är en sonderingsmetod med stark neddrivning, till exempel hejarsondering, inte väl lämpad för att urskilja jordlayerskillnader medan känsligare sonderingsmetoder, exempelvis CPT, är svårare att applicera vid undersökning av grövre material (Bergdahl 1984; SGF 2013). Därav används respektive typ av metod för olika ändamål, exempelvis stark neddrivning för att detektera berg eller en känslig provtagning för att utreda lermäktighet. På grund av varierande provtagningsdjup av samtliga sonderingar blir modellen som illustrerar friktionsjordens underkant missvisande. Då sonderingarna främst gjorts i syfte att utreda lermäktighet har sonderingarna inte bekräftat var friktionsjorden slutar och berggrunden börjar. Det har varit tydligt vid tolkning av borrhov att många sonderingsstopp inte skett på grund av möte av berg utan avbrutits mitt i friktionsjordens skikt. Resultaten över friktionsjordens mäktighet är därav extremt varierande eftersom provtagningen kan exempelvis ha avbrutits i de övre delarna av jordlagret. Detta innebär att friktionsjordens nivåkurvor och lager i tvärsnitten, som båda visar underkanten av skiktet, är troligtvis betydande avvikande verkligheten. En undersökning som ej gjorts, men kan ha betydande inverkan på markens stabilitet är att undersöka konsolideringstillståndet av friktionsjorden då den underliggande sanden kan bli konsoliderad vid pålning. Detta har inte undersökts i examensarbetet, men bör göras i en geoteknisk undersökning inför byggnation.

En utvecklingsmöjlighet inför vidare provtagning vid Akademiska sjukhuset är att utföra sonderingar med liknande metoder och till samma djup. Om sonderingar hade genomförts i syfte av detta projekt skulle ett borrhovprogram med genomgående liknande provtagningsmetoder varit fördelaktigt. Sonderingarna skulle då kunna placeras strategiskt, exempelvis i ett rutnät över hela sjukhusområdet, istället för det rådande underlaget som kan anses slumpartat och centrerat kring genomförda byggprojekt. En ny provtagning över sjukhusområdet skulle därav säkerställa att hela området undersökts till fullo. Sonderingarna

bör även göras ned till berggrunden för att fastställa friktionsjordens mäktighet. Fler punkter innebär även interpolering över kortare sträckor, vilket skapar en mer komplex bild att jordartsförändringarna. Dock, korta avstånd valdes vid interpolering i Topocad och därav kan interpoleringarna anses registrera åsens rumsliga förändringar i de områden som sonderingar utförts. Interpoleringen som nivåkurvorna baseras på bör således spegla geologin i åsen under sjukhuset relativt väl. Gällande tvärsnitten var sonderingarna relativt närliggande i de utvalda områdena, vilket ledde till en interpolering som skapade tämligen små trianglar och med det verklighetstroga resultat. Således, fler sonderingar för att komplettera områden med lite data, såsom område 3, hade gynnat den större helhetsbilden; nivåkurvor för hela Akademiska sjukhuset hade kunnat kartläggas och tvärsnitt hade kunnat sektioneras vart som än önskas vid sjukhusområdet i 3D-modellen.

En ytterligare problematik med modelleringen och interpoleringen är att jordlagerföljden skiftat mellan friktionsjord och lera i några sonderingar. GeoSuite kan inte tolka flera lager med samma kod i ett borrhprov, utan väljer endast den djupaste tolkningen och därav kommer inte den övre med. Genom att tolka med andra koder, exempelvis ansattes tolkning för sand istället för det övre lagret av friktionsjord och dy istället för det övre lagret av lera, kunde den varvade jordlagerföljden behållas. Dock, vid interpolering mellan de olika jordlagerna fanns endast ett fåtal punkter innehållande det som kategoriserades som dy eller sand, vilket inte resulterade i en interpolering som speglar verkligheten väl. Detta ledde till att de borrhprov med varvade skikt har endast tolkats med det undre jordlagret. Då detta endast gällde få sonderingar, mindre än fem stycken, kan det antas inte haft en stor inverkan på modelleringen i sin helhet. Denna problematik kan vara anledningen till att jordskikt korsas, vilket exempelvis syns tydligt i sektionen H-H, se Figur 19. En annan anledning till detta kan vara tidpunkten av sondering. Sonderingarna vid Akademiska sjukhuset som studerats i detta projekt har, som nämnt, utförts över 50 år. Detta innebär att mänsklig aktivitet kan ligga bakom att sonderingar som inte stämmer överens med andra lokaliserade precis intill. Exempelvis, om fyllnadsmaterial hamnat under leran i modellen kan det bero på att en provtagning gjorts efter att lera grävts bort och fyllning applicerats. Detta kan ske om sondering gjorts under eller efter byggskedet.

5.3 Utredd hydrogeologi och sättningsberäkningar av område 1–4

5.3.1 Område 1

Vid parkeringshuset T3 har sonderingar utförts utefter ett rutnätsmönster, vilket har resulterat i en tydlig bild av lerans utbredning. Tvärsnittet visar att lermäktigheten uppgår till dryga 20 m. Detta innebär att det finns risk för stora sättningar som sker över en längre tid om ingen grundläggning implementeras. Parkeringshuset byggdes 2015 och trots grundläggning har betydande sättningar redan infunnits, något stämmer överens med den mäktighet som erhållits i detta projekt. Byggnaden har en djupgrundsättning med pålning, dock endast vid pelarkonstruktionerna samt utan betongplatta under hela anläggningen. Detta har lett till att asfalten i bottenplan har sjunkit ojämnt och sprickor har uppkommit. Region Uppsala har etablerat en åtgärdsplan för detta där en ytgrundläggning ska förhåla och jämna ut sättningsprocessen (Eriksson 2021).

Vid detta område har två CRS-försök gjorts; ett vid ambulanshuset norr om parkeringshuset T3 samt ett inom T3. Pålastning av tre olika hypotetiska hus har studerats och det scenario som speglar komplexen vid Akademiska sjukhuset mest väl är det tredje; "oändligt" lång och bred last. CRS-försök 1 och 2 indikerar totalsättningar mellan cirka 20 och 70 cm. Beroende

på vilket c_v som använts vid beräkning av sättningarnas tidsförlopp skiljs resultaten markant. Utifrån rådfrågning av geotekniker med lång branschfarenhet är resultaten med $c_{v,min}$ rimliga, medan de med c_v vid 80 kPa inte är det. Detta betyder att sättningarna kommer uppnå 50% efter 24 till 33 år och att 100% nås efter 158 till 213 år. Detta stämmer även väl med sättningsförloppet som uppkommit vid T3 idag. Att detta speglar verkligheten väl validerar även att beräkningsmetoden varit verklighetstrogen. Enligt ekvation (21) är det endast parametern c_v som påverkar skillnaden i resultatet över tidsförloppet. Det är dock inte tydligt varför minimum-värdet ger ett mer verklighetstroget resultat. Det som är känt är att $c_{v,min}$ är den minsta konsolideringskoefficienten som uppmätts vid CRS-försöket och agerar som "worst-case" scenario eftersom ju mindre koefficienten är, desto långsammare sker konsolideringen och därmed sättningen. En långsam sättning kräver grundläggning med långt tidsperspektiv. Om sättningarna skulle ske i mycket snabbare takt hade en pålastning kunnat göras före byggnation och på sätt eliminera risken för sättningar efter att anläggning uppkommit. Det hade inneburit ett minskat behov för djupgrundläggning. Det är därför fördelaktigt att grundläggning dimensioneras utefter det värsta scenariot, men det kan också leda till onödigt stora kostnader utfall en sättning visas vara mindre problematisk. Dock, som nämnt stämmer resultaten med $c_{v,min}$ med det pågående förlopp vid T3 och därav tyder det på att $c_{v,min}$ är det värdet som bör användas vid denna typ av beräkning, något geotekniker generellt använder vid sättningsundersökningar.

Djupa lermäktigheter kan innebära sättningsrisker, men det innebär även att grundvattnet ligger djupt ner i marken då grundvattnets yta ligger i lerans underkant. Därav är det mindre sannolikhet att en grundvattensänkning behöver göras vid byggnation, något som underlättar tillståndsansökan för vattenverksamhet om det skulle krävas. Dock, enligt sektion A-A, se Figur 11, syns det att grundvattnets trycknivå ligger i medel endast cirka 2 m under marken. Detta innebär att tillstånd måste sökas inför bygge då området ligger inom den primära skyddszonen.

5.3.2 Område 2

Produktionsköket som projekteras att genomgå ombyggnation ligger inom område 2. Sektionerna B-B, C-C, D-D och E-E (Figur 13–16) fastslår att området innefattar lera. Tvärsnittet B-B, se Figur 13, visar ett sluttande lerlager mot Fyrisån mellan drygt 5 m och knappt 13 m. De resterande tvärsnitten påvisar lermäktigheter mindre än 5 m. Detta stämmer väl med åsens uppbyggnad; att lerans underkant sluttar bort från åsens höjd ner mot Fyrisån och att det djupaste lerlagret under produktionsköket lokaliseras mot område 1 som påvisat stora lermäktigheter. Dock, trots att denna utredning inte starkt tyder på problematiska lerlager vid område 2 ur ett sättningsperspektiv bör en geoteknisk utredning göras inför byggnation. Produktionskökets norra del indikerar att det finns djupare lager som kan behöva markförstärkning samt djupgrundläggning. Inget CRS-försök har gjorts vid detta område, därav rekommenderas det att det genomförs inför projektering då större mäktigheter av lera påvisats i norra delen av anläggningen.

Gällande grundvattnets trycknivå i medeltal fluktuerar gränsen av tre m från markyta till grundvattnets trycknivå; mellan mindre än 1 m upp till drygt 5 m. Detta innebär att tillståndsansökan måste högst sannolikt ansökas inför byggnation.

5.3.3 Område 3 och 4

I dagsläget finns betydligt mindre underlag för utredning av område 3 och 4 än 1 och 2. Det saknas CRS-försök i båda områden och det finns inga tillgängliga sonderingar i område 4.

Det som har gått att erhålla med det tillgängliga underlaget är tvärsnitt vid område 4, det vill säga platsen där den nya cyklotronbyggnaden ska anläggas. Tvärsnitten tyder på att markytan är kuperad och att grundvattnets trycknivå i medeltal ligger djupare än 3 m ned i marken. Resultaten över lermäktigheten är dock inte tydliga då de till stora delar korsar fyllningen. Detta beror troligtvis på att området har undergått flertalet byggnationer både ovan och under mark genom historien och med det finns sonderingar där fyllningen samt leran påträffats vid varierande djup.

Område 3 innefattar NOP-komplexet som hade varken sonderingar eller CRS-försök som underlag. Utifrån geotekniska rapporter omkring området förekommer inte markanta mäktigheter av lera, vilket tyder på att det troligtvis endast kommer ske mindre sättningar. En tes är att marken är mindre konsoliderad då området är högre upp i terrängen, det vill säga mindre vatten finns ytligt i marken. Framåt krävs gedigen geoteknisk undersökning innefattande flertalet sonderingar inför eventuell ombyggnation på platsen där både jordlagerföljden, sättningsbenägenheten och grundvattenbildningen undersöks noggrannare. På grund av begränsat underlag berörande marken vid område 3 och 4 är det inte möjligt att rekommendera en viss typ av grundläggning och markförstärkning innan vidare markundersökning gjorts.

5.4 Rekommendationer

Detta examensarbete ger en god överblick av hydrogeologin vid Akademiska sjukhuset. Fokuset har legat på sättningsbenägenhet och kartering av jordlagerföljd samt grundvatten. Resultaten indikerar vilka områden av sjukhusområdet med eventuellt problematiska lermäktigheter eller ytliga trycknivåer av grundvatten. Dock, det rum för ökad komplexitet gällande modelleringarna samt vilka parametrar som undersökts.

Modelleringen i Topocad och Civil 3D har baserats på nästan 500 sonderingar som tolkats med hjälp av GeoSuite. Majoriteten av dessa borrhov har sammanställts från Bjerkinges arkiv med genomförda geotekniska projekt vid sjukhuset. Projekten har gjorts med varierande syften och haft olika fokusområden av sjukhusets område. Detta har lett till att sonderingarna inte är jämt fördelade över hela sjukhusområdet samt att sonderingsmetoderna varierar. Om hela sjukhusområdet kunde genomgå ett nytt borrhovprogram skulle problematiken kring korsande jordskikt minimeras då tidpunkten av sondering inte blir en felkälla. Det är dock sannolikt inte rimligt att göra en helt ny systematisk provtagning som täcker hela Akademiska sjukhuset med avseende på budget, tid och framkomlighet. Således, de befintliga sonderingarna bör kompletteras för att minska långa avstånd mellan borrhovpunkter för att generera mer verklighetstroga och komplexa interpoleringar. Fokuset bör ligga vid område 3, det vill säga vid NOP-komplexet, då den ytan utgör störst brist av data; en tom zon i modellen i både Topocad och Civil 3D. För att öka komplexiteten rekommenderas det att sonderingar utförs ned till berg. Antalet sonderingar till berg är i dagsläget få över hela Akademiska sjukhuset, vilket gör att nivåkartan för berg täcker endast en liten del av hela sjukhusområdet. Djupare sonderingar kan även möjliggöra modellering av friktionsjordens totala mäktighet.

De CRS-försök som genomförts vid område 1 skulle eventuellt kunna utgöra underlag för undersökning av sättningsbenägenhet av det resterande sjukhusområdet. Metoden skulle innebära applicering av de erhållna parametrarna från CRS-analyserna i område 1 på andra områden av Akademiska sjukhuset, men att beräkningarna görs med de lerdjup som det nya studerade området innefattar, exempelvis lermäktigheterna i område 2–4. Utifrån detta examensarbete går det dock inte att utvärdera ifall denna lösning är möjligt då lerans egenskaper måste fastläggas vid område 1–4 för att se om markegenskaperna är tillräckligt jämbördiga för att applicera CRS-resultat från område 1. Det är möjligtvis enklast och billigast att utföra nya CRS-försök vid område 2–4, vilket då är en rekommendation för framtiden.

En ytterligare komplettering som rekommenderas inför projektering av ny- eller ombyggen vid Akademiska sjukhuset är att utreda fler faktorer som spelar in i en geoteknisk undersökning. I detta examensarbete har CRS-försök varit grunden till undersökning av sättningsbenägenhet, men utöver det har inte lerans egenskaper undersökts. Det rekommenderas att lerans karaktär studeras inför byggnation. Pålning är inte tillåtet i förorenade områden då risken att driva ner förorenade ämnen är stor med avseende på den fyllning (skärp, tegel, med mera) som applicerats vid Akademiska sjukhuset genom historien. En ytterligare rekommendation framåt är därav att göra en undersökning över föroreningsbilden vid sjukhusområdet.

Tvårsnittet vid område 3 och 4 anses otydliga då jordskikt korsas. Jordprover bör tas från dessa områden för att genomgå CRS-analys för att utreda sättningsbenägenhet samt nya sonderingar för att fastlägga jordskikt bör utföras. Den nya byggnationen vid område 4 är av dyrbart innehåll och därav bör gedigen geoteknisk undersökning göras innan.

Då det förekommer brunnar inom sjukhusområdet är ännu en rekommendation att installera nivågivare som kontinuerligt mäter grundvattnets trycknivåer. Detta ger exakta värden över grundvattenbilden i åsen under sjukhuset och kan bidra med värdefullt underlag vid tillståndsansökan inför byggnation eller vid planering av eventuell temporär grundvattensänkning. En sänkning av grundvattnet kan innebära ökad risk för sättningar då det leder en större belastning på jorden. Nivåerna regleras i åsen, vilket betyder att en ökad sättningsrisk från variationer i grundvattnet kommer inte vara aktuell. Dock, om sänkning görs inför byggnation måste omgivningspåverkan undersökas innan utifall skyddsinfiltration eller dylikt är nödvändigt. Resultaten i detta projekt ger en god bild av tryckytorna, men inte detaljerat nog som underlag i tillståndsansökan.

6. Slutsats

En god överblick av jordlagerföljden under Akademiska sjukhuset har erhållits med hjälp av modellering i Topocad och Civil 3D som baserats på borrhov tolkade i GeoSuite.

Jordlagerföljder har kartlagts i form av nivåkartor och tvärsnitt har tagits fram för områden som pekats ut som extra intressanta för framtida ny- eller ombyggnation. Som väntat för en rullstensås antyder resultaten att jordskiktets mäktighet varierar skarpt rumsligt.

Grundvattnets trycknivå har de senaste 20 åren legat inom den rådande vattendomens intervall och kommer således troligen fortsätta lokaliseras relativt statistiskt utefter resultaten.

Område 1, det vill säga parkeringshuset T3, har beräknats sjunka cirka 20 till 70 cm efter maximalt drygt 210 år om ingen grundläggning implementeras. Denna byggnad är dock redan

uppförd och agerar därav likt en validering för beräkningsmetoden. Med endast djupgrundläggning under pelarkonstruktionerna har T3 sjunkit utefter de sättningar som beräknats, vilket innebär att metoden varit väl genomförd. Resultaten styrker även att den väsentliga lermäktigheten kräver ytterligare grundförstärkning då sättningarna inte väntas avstanna inom kort sikt.

Utifrån modellering av jordskikt innehåller område 2–4 mindre mäktigheter av lera än i område 1. Magnituden av eventuella framtida sättningar utefter hur ytorna bebyggs kan dock inte fastställas. För att få svar på det kommer CRS-försök att behöva utföras. Område 2 och 3 har trycknivåer av grundvatten som kräver tillstånd inom primär skyddszon inför byggnation.

Slutligen, detta examensarbete ger en stabil bild över hur hydrogeologin ter sig vid Akademiska sjukhuset baserat på geotekniska data. Inför framtida projekt krävs dock geotekniska undersökningar för att fastställa vilka specifika grundläggningar som krävs för att säkra hållbara byggen långt fram i tiden.

Referenser

03FS 1990:1. *Uppsala läns författningssamling*. Uppsala: Uppsala länsstyrelse.

Akademiska sjukhuset. (2020). *Vår historia och framtid*. Tillgänglig: <https://www.akademiska.se/arbete-hos-oss/var-historia-och-framtid/> [2021-02-24]

Adtollo. (u.å.). *TOPOCAD*. [Broschyr]. Tillgänglig: <https://adtollo.se/wp-content/uploads/2018/08/broschyr-topocad-2017.pdf> [2021-02-22]

Axelsson, K. och Mattson, H. (2016). *Geoteknik*. 1:1 red. Lund: Studentlitteratur AB.

Beal, E. (2021). E-mail.

Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. London; New York: McGraw-Hill International Book co.

Bergdahl, U. (1984). *Geotekniska undersökningar i fält*. Linköping: SGI. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i2.pdf> [2021-02-21]

Carlén, G. Stadsbyggnadsförvaltningen, Uppsala Kommun. (2016). *Yttrande över förslag till riksintresseområde för anläggningar för dricksvattenförsörjning*. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/17ac2e3cff0b4c74b9a574e8c601a4a5/17-yttrande-over-forslag-till-riksintresseomrade-for-anlaggningar-for-dricksvattenforsorjning.pdf> [2021-02-15]

Djurberg, H. (2004). *Uppsala kommun - Miljökonsekvensbeskrivning*. Täby: AkvaNovum AB.

Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2013). *Marklära*. 1 uppl., Lund: Studentlitteratur.

Eriksson, J. (2021). E-mail.

Håkansson, H. (2021). E-mail.

Jostad, H. P., L'Heureux, J. S., Torgersrud, Ø. & Sandven, R. (2016). *GeoSuite – A Modular System for Geotechnical Design*.

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. (SGI Rapport 2008:5). Linköping: SGI. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf> [2021-03-05]

Larsson, R. (2015). *CPT-sondering, utrustning – utförande – utvärdering. En in-situ metod för bestämning av ordlagerföljd och egenskaper i jord*. (SGI Rapport 2015:3). Linköping: SGI. Tillgänglig: <https://sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i15.pdf> [2021-03-05]

Larsson, R., Sällfors, G., Alén, C., Bergdahl, U. & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord*. (SGI Rapport 2007:2). Linköping: SGI. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i3.pdf> [2021-02-21]

Länsstyrelsen Uppsala län (u.å.). *Vattenskyddsområde*. Tillgänglig: <https://www.lansstyrelsen.se/upsala/natur-och-landsbygd/aktiviteter-och-ingrepp-i-naturen/vattenskyddsomraden.html> [2021-04-29]

Naturvårdsverket. (2011). *Naturvårdsverkets handbok 2010:5 om Vattenskyddsområde*. Stockholm: Naturvårdsverket.

- Olsson, P-A. & Eriksson, P-O. (2015). *Nationella höjdsystem – historik*. Gävle: Lantmäteriverket. Tillgänglig: <https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-geodetisk-matning/historik-hojdsystem.pdf> [2021-02-21]
- Riksdagsförvaltningen. (2020). *Miljöbalk (1998:808) Svensk författningssamling 1998:1998:808 t.o.m. SFS 2020:1174 - Riksdagen*. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808 [2021-03-30]
- SGF (Sveriges Geotekniska förening). (2013). *Geoteknisk Fälthandbok*. (SGF Rapport 1:2013) Göteborg: SGF.
- SGF & BGS (Svenska Geotekniska Föreningen & Byggnadsgeologiska Sällskapet). (2001). *Beteckningssystem för geotekniska utredningar*. (2001:2).
- SGF (Sverige Geotekniska Förening). (2021). *Kolvprovtagare*. Tillgänglig: <https://www.fororenadeomraden.se/index.php/provtagningsmetoder/jord/borrbandvagn/kolvprovtagare> [2021-06-08]
- SGI (Statens Geotekniska Institut). (2020 a). *Geoteknisk undersökning*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/falt--och-laborariemetoder/geotekniska-undersokningar/> [2021-02-12]
- SGI (Statens Geotekniska Institut). (2020 b). *Jordens hållfasthet*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/skjuvhallfasthet/> [2021-02-12]
- SGI (Statens Geotekniska Institut). (2019 a). *Grundläggning och förstärkning*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/> [2021-02-12]
- SGI (Statens Geotekniska Institut). (2019 b). *Grundläggningsmetoder*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/grundlaggningsmetoder/> [2021-04-27]
- SGI (Statens Geotekniska Institut). (2013). *Olika typer av geotekniska borrhningar/sonderingar, SGF plan-symbol, jordart/lagerföljder från provtagning mm*. Tillgänglig: http://gis.swedgeo.se/dokument/gsp_typerborrningar_sgfsymboler_lagerfoljder.pptx [2021-02-09]
- SGU (Sveriges Geologiska Undersökning). (2020 a). *Isälvsediment – spår av isälvarna*. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/isen-smalter/isalvssediment-spar-av-isalvarna/> [2021-02-18]
- SGU (Sveriges Geologiska Undersökning). (2020 b). *Så mäter SGU grundvattennivåer*. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/om-grundvattennivaer/sa-mater-sgu-grundvattennivaer/> [2021-05-14]
- SKL (Sveriges kommuner och landsting). (2019). *Vattendomar*. Tillgänglig: <https://skr.se/samhallsplaneringinfrastruktur/miljohalsa/vatten/vattenbrist/vattendomar.27954.html> [2021-02-15]

SIS (1991). *Geotekniska provtagningsmetoder – Kompressionsegenskaper – Ödometerförsök, CRS-försök – Kohesionsjord (SS 027126)*. Stockholm: Svenska institutet för standarder

Stadsbyggnadskontoret. (2005). *Övergång till RH2000 – det korta infobladet*. Uppsala: Uppsala kommun.

Tremblay, M. (1990). *Mätning av grundvattennivå och portryck*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i11.pdf> [2021-06-06]

Uppsala Vatten och Avfall. (u.å. a). *Grundvatten från Uppsalaåsen*. Tillgänglig: <https://www.uppsalavatten.se/om-oss/verksamhet-och-drift/dricksvatten/uppalaasen-grundvatten/> [2021-02-15]

Uppsala Vatten och Avfall. (u.å. b). *Vattenförsörjning i Uppsala Stad*. [Faktablad]. Tillgänglig: https://www.uppsalavatten.se/globalassets/dokument/om-oss/verksamhet-och-drift/vattenforsorjning_uppsala_stad.pdf [2021-02-25]

Wall, E & Sjöberg, C. (2014). *Bilaga C Miljökonsekvensbeskrivning*. (1133221200).

Appendix

Indata från CRS-analys

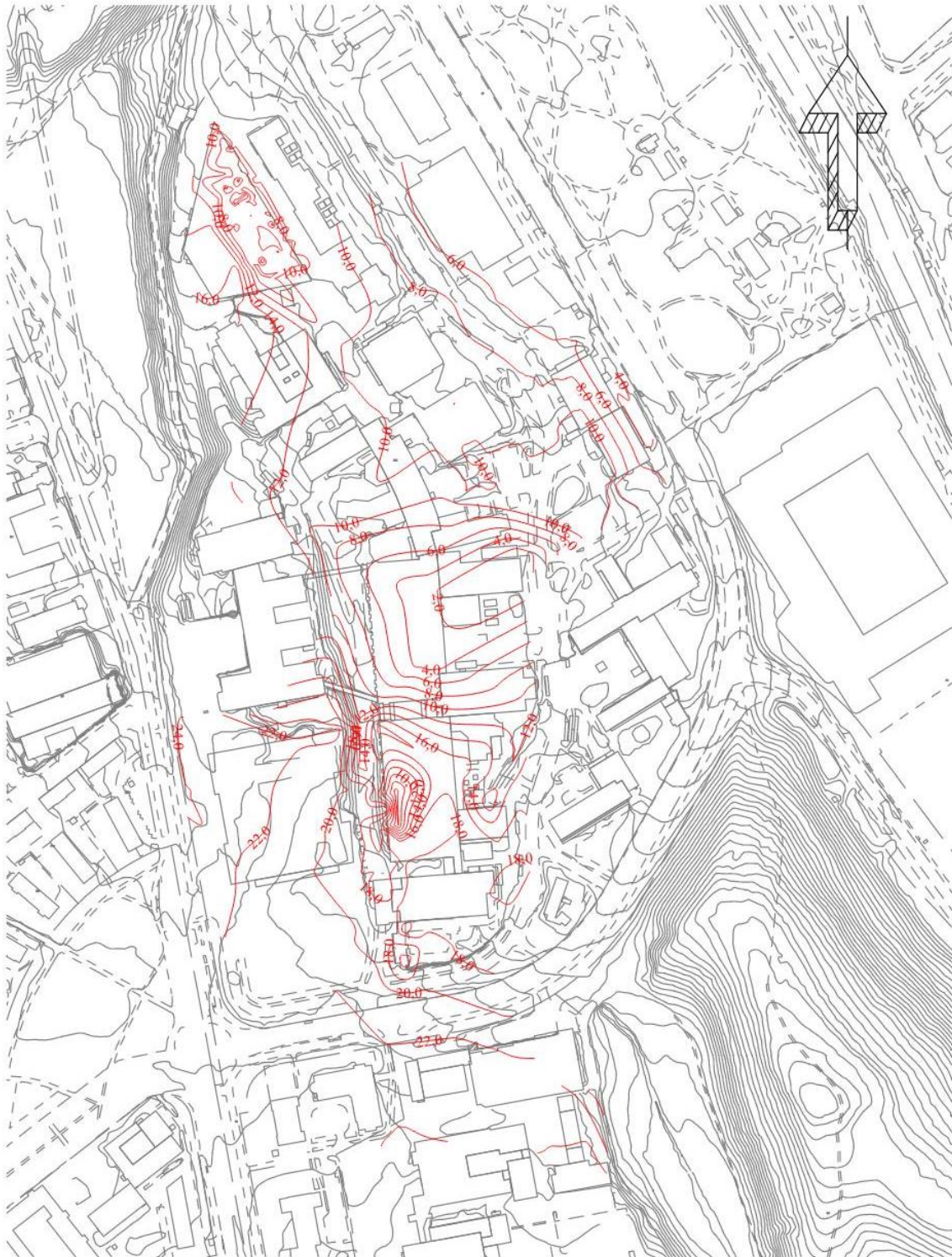
Tabell A1. Data från laborationsanalys av CRS-försök 1 samt härledningar utifrån det.

Parameter	Framtagning	Skikt 0 (fyllning)	Skikt 1	Skikt 2	Skikt 3	Skikt 4
Djup till skikts mitt; nivå z [m]	Se Figur 7.	1	3,5	8	12	18
Tjocklek av skikt, Δz [m]	Se Figur 7.	2	3	6	2	10
Djup från gv, z_{gv} [m]	Se Figur 7.	-2	1,5	6	10	16
Skjuvhållfasthet, τ_{fu} [kPa]	Från CRS- försök.	-	39	39	33	29
ν	$\nu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45}$	-	0,091	0,087	0,102	0,108
$\tau_{fu,korr}$ [kPa]	$\tau_{fu,korr} = \tau_{fu}\nu$	-	3,56	3,37	3,36	3,14
M'	Från CRS- försök.	-	10,5	8,5	10,3	12,1
M_L [kPa]	Från CRS- försök.	-	80	81	85	132
Förkonsolideringstryck, σ'_c [kPa]	Från CRS- försök.	-	112	89	101	92
σ'_L [kPa]	Från CRS- försök.	-	152	134	148	162
Densitet, ρ [ton/m ³]	Från CRS- försök.	-	1,52	1,47	1,6	1,67
Egentyngd, γ [kN/m ³]	$\gamma = g\rho$	18 (antagande)	14,91	14,42	15,70	16,38
Vattenkvot, W [%]	Från CRS- försök.	-	81	86	64	58
Konflytgräns, W_L [%]	Från CRS- försök.	-	88	99	69	60

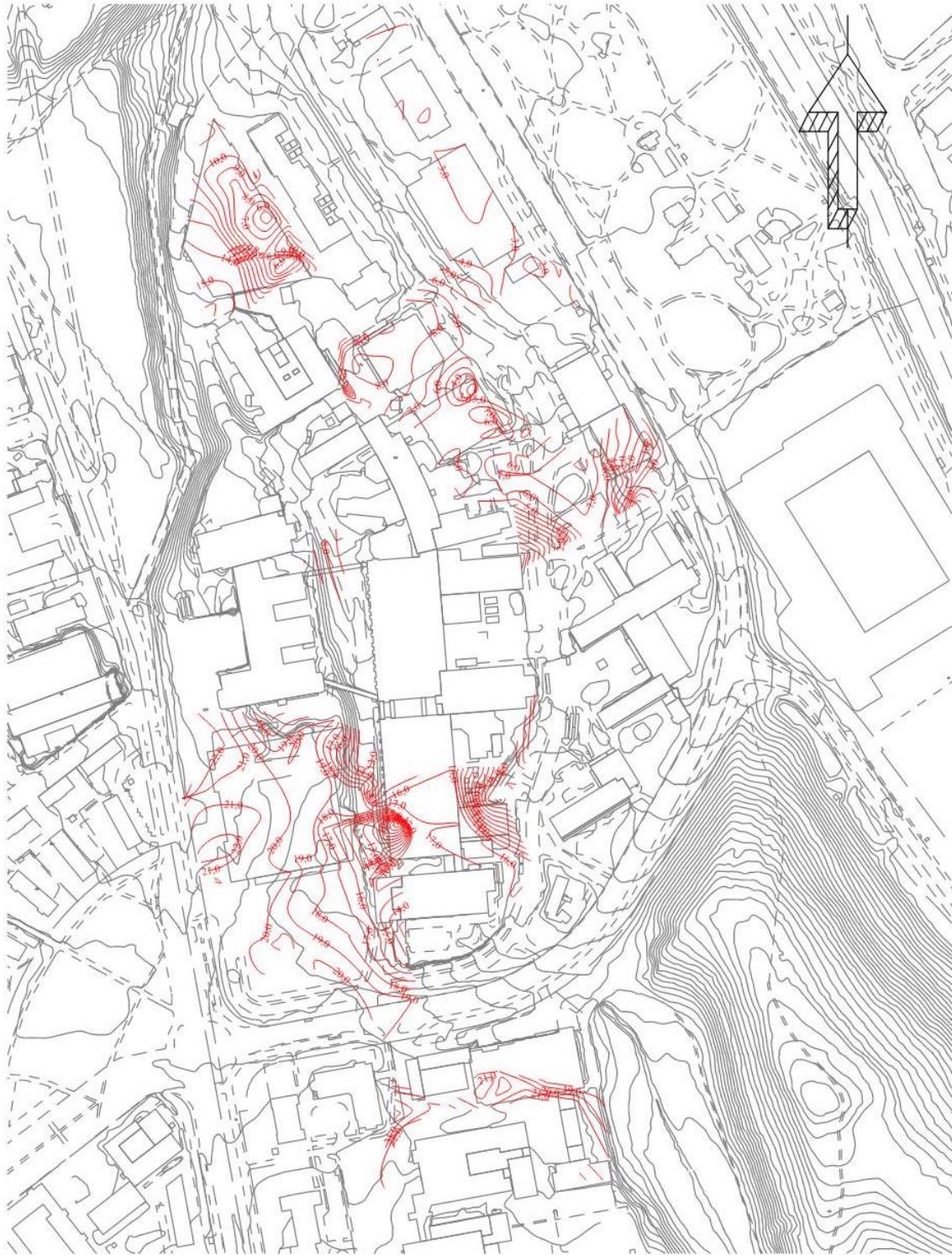
Tabell A2. Data från laborationsanalys av CRS-försök 2 samt härledning utifrån det.

Parameter	Framtagning	Skikt 0 (fyllning)	Skikt 1	Skikt 2	Skikt 3
Djup till skikts mitt; nivå z [m]	Se Figur 7.	1	4	12	20
Tjocklek av skikt, Δz [m]	Se Figur 7.	2	4	12	5
Djup från gv, z_{gv} [m]	Se Figur 7.	-1	2	10	18
Skjuvhållfasthet, τ_{fu} [kPa]	Från CRS- försök.	-	31	43	43
ν	$\nu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45}$	-	0,088	0,091	0,109
$\tau_{fu,korr}$ [kPa]	$\tau_{fu,korr} = \tau_{fu}\nu$	-	2,72	3,90	4,70
M'	Från CRS- försök.	-	9,9	8,9	12,6
M_L [kPa]	Från CRS- försök.	-	598	953	1230
Förkonsolideringstryck, σ'_c [kPa]	Från CRS- försök.	-	61	100	151
σ'_L [kPa]	Från CRS- försök.	-	101	165	218
Densitet, ρ [ton/m ³]	Från CRS- försök.	-	1,48	1,47	1,7
Egentyngd, γ [kN/m ³]	$\gamma = g\rho$	18 (antagande)	14,52	14,42	16,68
Vattenkvot, W [%]	Från CRS- försök.	-	92	89	59
Konflytgräns, W_L [%]	Från CRS- försök.	-	96	89	59

Nivåkurvor över samtliga jordskikt



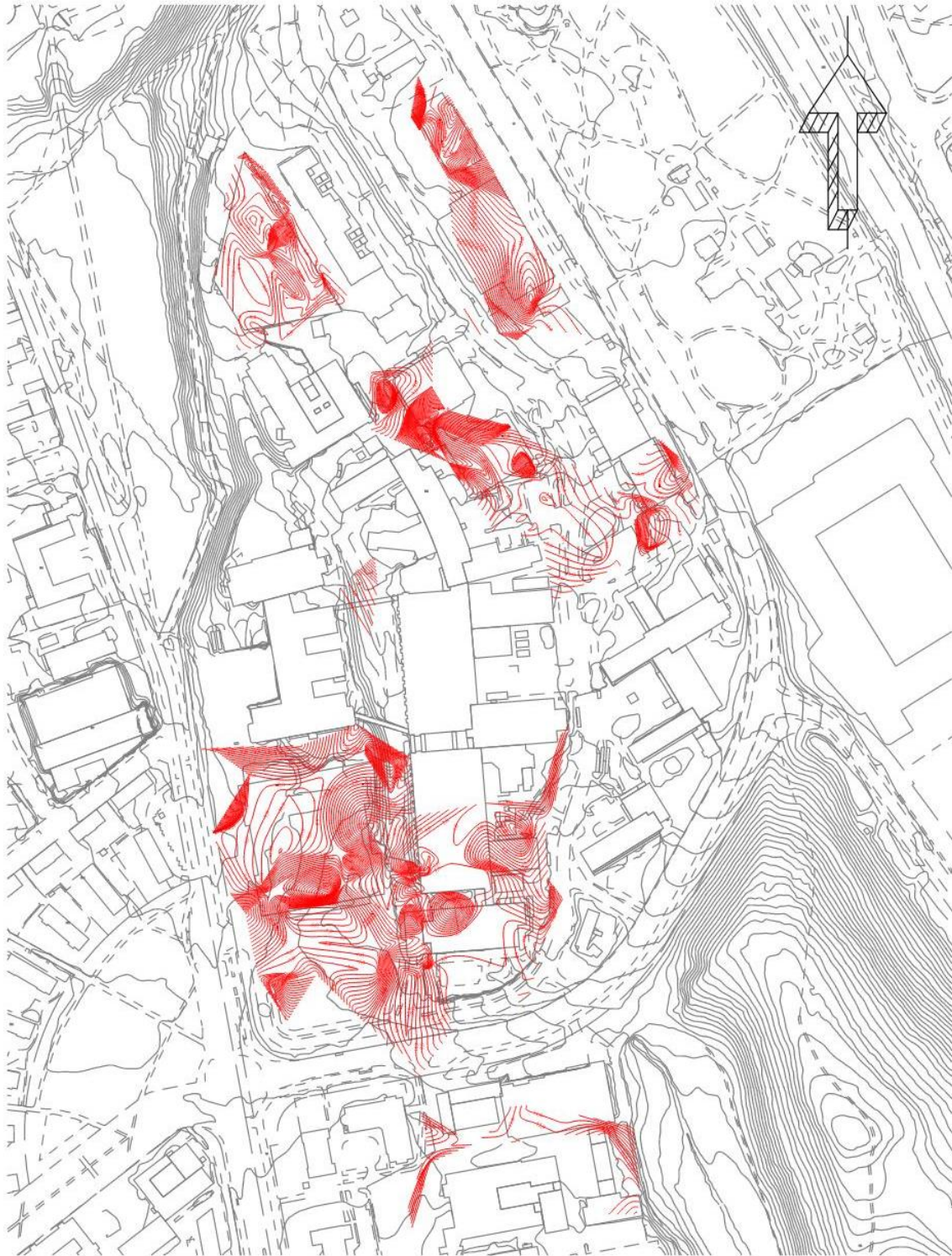
Figur A3. Nivåkurvor över markytan utifrån interpolerade sonderingar i Topocad.



Figur A4. Nivåkurvor över fyllnadsmaterialets underkant utifrån interpolerade sonderingar med tolkningar av fyllning. Nivåkurvor skapade i Topocad.



Figur A5. Nivåkurvor över lerans underkant utifrån interpolerade sonderingar med lertolkning. Nivåkurvor skapade i Topocad.



Figur A6. Nivåkurvor över friktionsjordens underkant utifrån interpolerade sonderingar med tolkningar av friktionsjord. Nivåkurvor skapade i Topocad.



*Figur A7. Nivåkurvor över berg utifrån interpolerade sonderingar med bergtolkning.
Nivåkurvor skapade i Topocad.*

Resultat – sättningsberäkningar

Tabell A8. Sättning för respektive markskikt då $q = 10 \text{ kPa}$ för rektangulär last ($b = 5 \text{ m}$ och $l = 10 \text{ m}$) samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	25,58	47,72	66,13	84,29	121,34
Konsolideringavsikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0049	0,0025	0,0016	0,00059
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0147	0,0152	0,0032	0,0059
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	1,47	1,52	0,32	0,59

Tabell A9. Sättning för respektive markskikt då $q = 20$ kPa för rektangulär last ($b = 5$ m och $l = 10$ m) samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	33,15	52,08	68,27	85,63	122,12
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0098	0,00507	0,0032	0,0012
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0294	0,0304	0,0064	0,0117
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	2,94	3,04	0,64	1,17

Tabell A10. Sättning för respektive markskikt då $q = 10$ kPa för "oändligt" lång last med $b = 5$ m samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	26,33	49,25	67,84	85,89	122,74
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0066	0,0046	0,0035	0,0016
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0198	0,0274	0,0070	0,0164
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	1,98	2,74	0,70	1,64

Tabell A11. Sättning för respektive markskikt då $q = 20 \text{ kPa}$ för "oändligt" lång last med $b = 5 \text{ m}$ samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0' + \Delta\sigma'$	34,67	55,13	71,69	88,84	124,91
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,013	0,0091	0,00701	0,0033
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0397	0,0547	0,0140	0,0329
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	3,97	5,47	1,40	3,29

Tabell A12. Sättning för respektive markskikt då $q = 10 \text{ kPa}$ för "oändligt" lång och bred last samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0' + \Delta\sigma'$	28,00	53,37	74,00	92,95	130,56
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan NC.	-	OC	OC	OC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,011	0,023	0,012	0,0076
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0337	0,0711	0,0238	0,0756
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	3,37	7,11	2,38	7,56

Tabell A13. Sättning för respektive markskikt då $q = 20$ kPa för "oändligt" lång och bred last samt väsentliga parametrar (CRS 1).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3	4
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18	58,37	124,00	182,95	280,56
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	15,00	60,00	100,00	160,00
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18	43,47	64,00	82,95	120,56
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	38,00	63,37	84,00	102,95	140,56
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC+NC	NC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	889,30	843,39	839,52	-
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,022	0,024	0,024	0,015
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0675	0,1423	0,0476	0,1513
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	6,75	14,23	4,76	15,13

Tabell A14. Sättning för respektive markskikt då $q = 10$ kPa för rektangulär last ($b = 5$ m och $l = 10$ m) samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	25,58	49,01	81,94	129,48
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0058	0,0014	0,00057
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0234	0,0164	0,0028
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	2,34	1,64	0,28

Tabell A15. Sättning för respektive markskikt då $q = 20 \text{ kPa}$ för rektangulär last ($b = 5 \text{ m}$ och $l = 10 \text{ m}$) samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	33,15	52,97	83,27	130,15
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,012	0,0027	0,0011
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0467	0,0329	0,0057
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	4,67	3,29	0,57

Tabell A16. Sättning för respektive markskikt då $q = 10 \text{ kPa}$ för "oändligt" lång last med $b = 5 \text{ m}$ samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	26,33	50,59	83,54	130,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0082	0,00301	0,0017
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0327	0,0362	0,0085
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	3,27	3,62	0,85

Tabell A17. Sättning för respektive markskikt då $q = 20$ kPa för "oändligt" lång last med $b = 5$ m samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	24,67	56,15	86,48	132,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,016	0,00603	0,0034
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0654	0,072	0,0170
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	6,54	7,24	1,70

Tabell A1826. Sättning för respektive markskikt då $q = 10$ kPa för "oändligt" lång och bred last samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	28,00	55,04	90,60	138,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC	OC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,015	0,0103	0,0085
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,0588	0,1230	0,0426
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	5,88	12,30	4,26

Tabell A19. Sättning för respektive markskikt då $q = 20 \text{ kPa}$ för "oändligt" lång och bred last samt väsentliga parametrar (CRS 2).

Parameter	Beräkning	0 (fyllning)	1	2	3
Ursprungstryck, σ_0 [kPa]	$\sigma_0 = \gamma z + \gamma \Delta z_{n-1}$	18,00	65,04	180,60	308,82
Portryck, u [kPa]	$u = \gamma_w z_{gv}$	0 (inga kapillärkrafter antas)	20	100	180
Vertikalt effektivtryck, σ_0' [kPa]	$\sigma_0' = \sigma_0 - u$	18,00	45,04	80,60	128,82
Sluttryck, σ_2' [kPa]	$\sigma_2' = \sigma_0 + \Delta\sigma'$	28,00	55,04	90,60	138,82
Konsolidering av skikt	OC, NC, OC+NC eller ovan.	-	OC+NC	OC+NC	OC
M_0	$M_0 = 250\tau_{fu,korr}$	-	679,74	975,54	1173,78
Töjning, ε	Se ekvation X-Y för del olika konsolideringarna.	-	0,0302	0,0205	0,017
Kompression, δ [m]	$\delta_{[m]} = \varepsilon \Delta z$	-	0,1209	0,2462	0,0852
Sättning [cm]	$\delta_{[cm]} = 100\delta_{[m]}$	-	12,09	24,62	8,52