



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 18 033

Examensarbete 30 hp  
Juni 2018

# Kungsängslerans krypsättning

Analys av dess storleksordning och kryppparametrar  
samt förslag på lämplig beräkningsmetod

---

Maria Nylander

## REFERAT

### **Kungsängslerans krypsättning – Analys av dess storleksordning och krypparametrar samt förslag på lämplig beräkningsmetod**

*Maria Nylander*

Kungsängen är ett centralt beläget område i Uppsala. Området har stora mäktigheter av lera som når drygt 100 meters djup på sina håll. För att bygga på denna typ av jord måste långtidssättningar såsom konsolidering och krypning tas i beaktning. Att fastställa och beräkna krypningens storlek är dock svårt på grund av att det är en matematiskt komplicerad process. Det råder även oenigheter gällande när krypning inträder under sättningsförloppet samt gällande lämplig beräkningsmetod. För att erhålla en djupare förståelse för Kungsängslerans krypning samt för att finna en lämplig beräkningsmetod togs detta arbete fram i samarbete med Bjerking.

Höjdavvägningar från dubbar och fixpunkter belägna i Kungsängen sammanställdes och resultaten visade att byggnader i Kungsängen som byggdes för 80–170 år sedan utsätts för krypning än idag. Medelvärde av den relativa krypsättningen erhöles till 0,134 promille av lermäktigheten per år för dubbavvägningarna respektive 0,067 för fixpunktsavvägningarna. Ytterligare påvisade resultaten att både tid och lermäktighet var två drivande faktorer bakom Kungsängslerans krypning.

Den europeiska standarden Eurokod 7 undersöktes för att finna förslag på beräkningsmetoder för krypning. Standarden hade dock inga konkreta förslag utan hänvisade till allmänt erkända metoder. Av denna anledning undersöktes tidsmotståndsteorin samt Chalmersmodellen med kryp. Tidsmotståndsteorin beräknade både realistiska och överskattade krypsättningar beroende på typ av lera. Vissa lerprover antydde att laster under cirka 45 kPa gav en försumbar krypning med andra lerprover indikerade annorlunda. Tidsmotståndsteorin har dock potential att vara en lämplig metod för beräkning av Kungsängslerans krypsättning. Chalmersmodellen med kryp tillämpades för att modellera ödometerförsök och resultaten visade att modellen generellt överskattade den totala deformationen och underskattade kryphastigheten. För att kunna förkasta eller verifiera modellen som lämplig vid beräkning av krypsättningar för Kungsängslera bör dock utförligare studier genomföras.

**Nyckelord:** Krypning, lera, Kungsängen, Eurokod 7, Chalmersmodellen med kryp, tidsmotståndsteorin, Uppsala

*Institutionen för teknikvetenskaper, Byggt teknik, Uppsala Universitet (UU)*

*Lägerhyddsvägen 1*

*Box 534, SE-751 21, Uppsala*

## **ABSTRACT**

### **Creep of Kungsängen clay – Analysis of its order of magnitude and creep parameters, and proposition of appropriate calculation method**

Kungsängen, a central area in Uppsala of Sweden, has a considerable depth of clay which stretches down to 100 m at some sites. In order to build at this type of soil one has to take long-term settlements into consideration, such as consolidation and creep. However, methods for calculating the latter aren't straight forward since the mathematics behind the process is complicated. The starting time of creep is still unsettled and this is also the case regarding calculation methods. In order to enhance the understanding of creep of Kungsängen clay this study was developed in collaboration with Bjerking AB.

Altimetry data from studs and fixed points from Kungsängen was compiled and the results showed that buildings in Kungsängen are experiencing creep even though some of them were built 80–170 years ago. The mean value of relative creep was found to be 0,134 per mille/year for the stud data and 0,067 per mille/year for fixed points. Another finding was that time and depth of clay were two factors behind the creep of Kungsängen clay.

Another aim of the study was to investigate creep calculations methods in Eurocode 7. However, it was found that no method was proposed in the standard and therefore some other methods such as the time resistant theory and the Chalmer's model with creep were investigated. It was found that the time resistant theory predicted creep realistically but with an overestimation in some cases, depending on the type of clay. Some clay specimen gave a negligible creep for loads under 45 kPa and other specimen indicated otherwise. All in all, this suggests that the time resistant theory might be an appropriate creep calculation method for the clay of Kungsängen. The Chalmer's model with creep overestimated the total deformation but underestimated the creep when modelling odometer loads. Even so, the study of the model was not detailed enough in order to reject it or not. Therefore, a more detailed study of the model should be considered.

**Key words:** Creep, clay, Kungsängen, Eurocode 7, Chalmer's model with creep, time resistant theory, Uppsala

*Department of Engineering Sciences, Structural Engineering, Uppsala University (UU)  
Lägerhyddsvägen 1  
Box 534, SE-751 21, Uppsala*

## FÖRORD

Detta arbete omfattar 30 högskolepoäng och avslutar mina studier till civilingenjör i miljö och vattenteknik, en femårig utbildning som jag påbörjade höstterminen år 2013. Arbetet har utförts på uppdrag av Bjerking och det är från Bjerking's kontor i Uppsala som merparten av detta arbete skrivits och utförts. Till min hjälp och stöd har jag haft mina handledare Esra Bayoglu Flener och Teddy Johansson, båda anställda via Bjerking. Universitetsadjunkt Nico Van Dijk vid institutionen för teknikvetenskaper har varit min ämnesgranskare och Björn Claremar vid institutionen för geovetenskaper har varit min examinator.

Först vill jag rikta ett varmt tack till företaget Bjerking och avdelning Geo som gav mig möjlighet till detta samarbete. Att ha tillgång till en kontorsplats, lånedator och kollegor har jag uppskattat oerhört mycket och det har utan tvekan höjt min arbetsmoral under terminen. Jag vill även tacka mina två handledare som under arbetet kommit med utvecklande konstruktiv kritik och som funnits nära till hands för att svara på mina frågor. Jag vill även tacka Mats Karlsson på Chalmers som utan skyldighet hjälpsamt har svarat på mina frågor som jag ådrog mig under litteraturstudien. Ytterligare ett tack vill jag rikta till Nico Van Dijk som med kort varsel ställde upp som ämnesgranskare och som därefter varit behjälplig inom alla områden. Allra sist vill jag även tacka min sambo som hjälpt mig att lusläsa rapporten efter svårfunna fel och som även varit ett privat stöd.

Jag hoppas att detta examensarbete kan bidra till att arbete med krypning i Uppsala utvecklas och att fler blir medvetna och kunniga inom området.

*Uppsala 2018*  
*Maria Nylander*

# POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

## **Kungsängslerans krypsättning – Analys av dess storleksordning och krypparametrar samt förslag på lämplig beräkningsmetod**

*Maria Nylander*

Uppsala är liksom många andra städer i Sverige en stad som expanderar snabbt med hållbarhet i fokus. Som en del av arbetet bakom expansionen finns geotekniken som utgör grunden för en säker produktion. Uppsala är en särskild utmaning vid geotekniskt förarbete eftersom staden vilar på stora mäktigheter av lera. Leran ger nämligen upphov till krypning, en vertikal sättning med liten hastighet som påbörjas långt efter att en last tillförts marken.

Det har visats att byggnader på denna typ av lera som byggdes för över hundra år sedan än idag utsätts för krypsättningar. Även om krypningens bidrag är liten över korta tidsperspektiv bidrar den i det långa loppet till en betydande andel av den totala sättningen. Att vid nyproduktion dimensionera grundläggning med flera hundra år i beaktning kan således vara en nödvändighet för att undvika omfattande och kostsamma skador. Detta arbete påvisade att krypning sker för 80–170 år gamla byggnader belägna i Kungsängen med omnejd i Uppsala. Två bakomliggande faktorer som signifikant korrelerade till krypningen var tid och lermäktighet och ett medelvärde över mätningar för den relativa krypsättningen erhöles till 0,134 promille av den totala lermäktigheten per år.

Det finns välutvecklade och beprövade metoder för beräkning av primär sättning vilka har använts vid geotekniskt förarbete sedan länge. För vissa jordtyper är det fullt tillräckligt att endast beräkna primär sättning, men för städer såsom Uppsala där krypningen får stor betydelse av den totala sättningen måste även denna beräknas. Att beräkna krypningen är dock inte självklart då det fortfarande råder meningsskiljaktigheter bland forskare och utövare gällande när krypning inträder under sättningsförloppet samt hur det bör beräknas.

Det är av stor vikt att det geotekniska förarbetet genomförs effektivt eftersom det råder brist på geotekniker i konsultbranschen samt eftersom det är högt tryck på nyproduktion. Det finns försök till att effektivisera och homogenisera det geotekniska arbetet med europeiska standarder såsom Eurokod, men det råder fortfarande brist på användarvänliga metoder för beräkning av krypning som dessutom lämpar sig för samtliga EU-medlemsländer. Med lokalt fokus finns det således ett behov att finna en lämplig beräkningsmetod för den lera som finns i Uppsala men samma behov finns även ur ett globalt perspektiv. Det är dessutom viktigt att arbetet genomförs med goda säkerhetsmarginaler och på ett homogent sätt inom konsultbranschen och här finns det utvecklingspotential. Detta arbete påvisade att den europeiska standarden Eurokod 7 påpekar att hänsyn skall tas till krypning men ger inget konkret förslag på lämplig beräkningsmetod.

Arbetet undersökte även tidsmotståndsteorin och Chalmersmodellen men kryp i Geosuite Settlement för att beräkna Kungsängslersans krypning. Båda metoderna var tidsineffektiva och arbetsomfattande, vilka krävde laborationsresultat från både ödometer- och CRS-försök. Chalmersmodellen med kryp tenderade att överskatta den totala deformationen vid modellering av ödometerförsök men underskatta krypningen och liknande tendenser sågs hos tidsmotståndsteorin. Behovet av en effektiv, tillförlitlig och allmängiltig beräkningsmetod för krypning finns således kvar ur ett storskaligt perspektiv, men tidsmotståndsteorin kan troligtvis användas för Kungsängslera innan en sådan metod presenterats.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING .....	1
1.1	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR.....	1
1.2	ARBETSMETOD .....	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR.....	2
2.	BAKGRUND OCH TEORI .....	3
2.1	LERANS EGENSKAPER.....	3
2.1.1	Lera avsatt från söt- och saltvatten .....	4
2.2	SPÄNNING I JORD.....	5
2.2.1	Förkonsolideringstryck.....	5
2.2.2	Normal- och överkonsoliderad jord.....	5
2.3	SÄTTNING .....	6
2.3.1	Primär sättning och konsolidering.....	6
2.3.2	Krypsättning .....	7
2.4	JORDS DEFORMATIONSEGENSKAPER.....	8
2.4.1	Ödometer .....	8
2.4.2	CRS.....	9
2.5	KRYPNING MED TIDSMOTSTÅNDSTEORIN.....	10
2.6	CHALMERSMODELLEN MED KRYP .....	12
2.6.1	Parametrar till modellen .....	12
2.6.2	Teorin bakom modellen.....	12
2.7	UTVÄRDERING AV KRYPPARAMETRAR.....	14
2.7.1	Från CRS-försök.....	14
2.7.2	Från ödometerförsök .....	14
2.7.3	Från empiriska samband.....	15
2.8	KRYPNING I EUROKOD.....	16
2.8.1	Eurokod 7 .....	17
2.8.2	SS027129.....	17
2.8.3	ISO TS 17892-5.....	17
3.	METOD.....	19
3.1	OMRÅDET KUNGSÄNGEN.....	19
3.2	UPPMÄTT KRYPSÄTTNING .....	20

3.3	BERÄKNAD KRYPSÄTTNING.....	21
3.3.1	Tidsmotståndsteorin .....	21
3.3.2	Empiriska samband .....	23
3.3.3	Eurokod 7 .....	23
3.4	MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT .....	23
4.	RESULTAT.....	25
4.1	UPPMÄTT KRYPSÄTTNING .....	25
4.2	BERÄKNAD KRYPSÄTTNING.....	28
4.2.1	Tidsmotståndsteorin .....	28
4.2.2	Empiriska samband .....	33
4.3	MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT .....	34
5.	DISKUSSION .....	37
5.1	UPPMÄTT KRYPSÄTTNING .....	37
5.1.1	Krypsättning – Kungsängen .....	37
5.1.2	Krypsättning – kvarteret Gudrun.....	38
5.1.3	Normaliserad sättning.....	38
5.1.4	Relativ sättning.....	38
5.2	BERÄKNAD KRYPSÄTTNING.....	38
5.2.1	Tidsmotståndsteorin .....	38
5.2.2	Empiriska samband .....	40
5.2.3	Eurokod 7 .....	40
5.3	MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT .....	41
6.	SLUTSATSER .....	42
7.	FRAMTIDA STUDIER .....	43
	REFERENSER.....	44
	BILAGA A – Data från försök med ödometer .....	47
	BILAGA B – Uppmätt krypning .....	50
	BILAGA C – Data från försök med CRS.....	52
	BILAGA D – Krypning med tidsmotståndsteorin.....	53



## BETECKNINGAR

Symbol	Förklaring	Enhet
$\delta$	Sättning/deformation	m
$\varepsilon$	Töjning	-
$\varepsilon_0$	Primär töjning	-
$\varepsilon_{cr}$	Kryptöjning	-
$\sigma$	Spänning	Pa
$\sigma'$	Effektivspänning	Pa
$u$	Portryck	Pa
$\sigma_{1,2,3}$	Huvudspänningskomponenter	Pa
$\sigma_{x,y,z}$	Normalspänningskomponenter	Pa
$\tau_{zx,yz,xy}$	Skjuvspänningskomponenter	Pa
$\sigma'_c$	Förkonsolideringstryck	Pa
$\sigma'_L$	Gränstryck	Pa
$N$	Normalkraft	N
$T$	Skjuvkraft	N
$M$	Kompressions-/ödometermodul	Pa
$M_0$	Modul innan förkonsolideringstryck	Pa
$M_L$	Modul mellan förkonsolideringstryck och gränstryck	Pa
$m/M'$	Kompressionsmodultal	-
$a_0$	Faktor	-
$a_1$	Faktor	-
$r$	Kryptal	-
$r_0$	Konstant kryptal	-
$r_1$	Konstant kryptal	-
$R$	Tidsmotstånd	s
$R_0$	Tidsmotståndskonstant vid krypning	s
$t$	Tid	s
$t_r$	Referenstid	s
$t_0$	Tidpunkt krypning inträder	s
$\psi$	Kryptalets lutning	-
$b_0$	Faktor	-
$b_1$	Faktor	-
$z$	Lagertjocklek eller djup	m
$\gamma_w$	Vattnets tunghet	N/m <sup>3</sup>
$\gamma_d$	Torr tunghet	N/m <sup>3</sup>
$k$	Permeabilitet	m/s
$c_v$	Konsolideringskoefficient	m <sup>2</sup> /s
$T_v$	Tidsfaktor	s
$U$	Konsolideringsgrad	-
$h$	Kortast dräneringsväg	m



# 1. INLEDNING

Kungsängen är ett centralt beläget område i Uppsala som förenklat avgränsas av Fyrisån, järnvägen, Bangårdsgatan och Kungsängsleden. Kungsängens jordart består främst av glacial och postglacial lera som når upp emot 100 m djup på sina håll (Bjerking, 1988). Vid anläggning och byggnation på denna typ av lera bör krypning tas i beaktning vid sättningsberäkningar, vilket är en utmaning eftersom krypning är en tidsberoende vertikal sättning som sker under konstant spänning (Larsson, 2008). Krypningen påbörjas lång tid efter att last tillförts marken med en låg sättningshastighet och är således en matematiskt svårbeskriven process (Olsson, 2010). Fenomenet krypning har varit allmänt känt sedan länge men det råder fortfarande meningsskiljaktigheter bland forskare gällande när krypningen inträder under sättningsförloppet samt gällande vilka teorier som är bäst lämpade vid beräkning (Havel, 2004).

Anläggning och byggnation ska genomföras i enlighet med det som fastställs i Eurokoder, vilka infördes år 2011 för att upprätthålla en homogeniserad hög standard och säkerhetsnivå för EU-medlemsländer. Ett syfte med arbetet var att undersöka vad som fastställs gällande beaktning och beräkning av krypning i Eurokod 7 som behandlar dimensionering av geokonstruktioner samt att tillämpa detta (European Commission, u.d.). Arbetet undersökte även tidsmotståndsteorin som presenterades av Janbu (1969) samt Chalmersmodellen med kryp som finns implementerad i programmet Geosuite Settlement (Novapoint, 2016).

Att identifiera storleksordningen på den krypsättning som skett och sker för Kungsängen är av intresse, inte minst för att verifiera om de olika beräkningsmetoderna förutspår en rimlig krypsättning. Det är dock en utmaning att sammanställa detta eftersom mätdata över sättningar som sträcker sig långt bak i tiden är ovanliga. Bjerking innehar dock mätningar av diverse marktekniska parametrar för Kungsängen från 1960-talet och framåt vilket ger en unik möjlighet att utröna Kungsängens krypsättning (Johansson & Bayoglu Flener, 2018).

## 1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med föreliggande arbete är att utröna storleksordningen på Kungsängens krypsättning och krypparametrar för att erhålla en djupare förståelse för krypningens påverkan på området. Arbetet syftar även till att finna en lämplig metod för beräkning av krypsättningar för Kungsängslera.

Fyra frågeställningar är formulerade för arbetet:

1. Vilken storleksordning av krypsättning sker i området Kungsängen i Uppsala?
2. Vilken storleksordning av krypsättning erhålls med metoder i Eurokod 7 samt är dessa metoder lämpliga vid beräkning av Kungsängslerans krypsättning?

3. Vilken krypsättning och kryppparametrar erhålls med tidsmotståndsteorin för Kungsängslera samt är teorin lämplig vid beräkning av Kungsängslerans krypsättning?
4. Ger Chalmersmodellen med kryp samma resultat som laborerade ödometerförsök samt är modellen lämplig för beräkning av Kungsängslerans krypsättning?

## **1.2 ARBETSMETOD**

För att uppfylla arbetets syfte och fyra frågeställningar genomfördes initialt en litteraturstudie för att besluta vilken krypteori samt modell i Geosuite Settlement arbetet skulle fokusera på. Detta beslut låg därefter som grund för hur arbetets syfte och frågeställningar formulerades.

För att besvara frågeställning 1 genomfördes ett arkivsök i Bjerkinges arkiv för att finna mätserier av höjdavvägningar för dubb och fixpunkter från Kungsängen. Försök med ödometer eftersöktes eftersom dessa kunde användas för att identifiera kryppparametrar samt för att beräkna krypsättning enligt tidsmotståndsteorin, vilket var önskvärt i frågeställning 3. Utöver de ödometerförsök som erhöles från arkivsöket för att besvara frågeställning 3 genomfördes även ödometerförsök i Bjerkinges laboratorium. Frågeställning 4 besvarades genom att simulera ödometerförsök med Chalmersmodellen med kryp samt genom att jämföra detta med laborerade ödometerförsök.

## **1.3 AVGRÄNSNINGAR**

Arbetet avgränsades till att studera området Kungsängen i Uppsala. Arbetet behandlade endast Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp i Geosuite Settlement. Tidsmotståndsteorin var den enda krypteori som arbetet behandlade utöver metoder i Eurokod 7 och Geosuite Settlement. Under arkivsöket eftersöktes endast byggnader som var grundlagda med kallmur, rust och sulor varav byggnader grundlagda på trä- och betongpålar valdes bort. All data i arbetet behandlar punkter som är belägna i eller i närheten av Kungsängen där lera är den dominerande jordfraktionen.

## 2. BAKGRUND OCH TEORI

I följande kapitel presenteras bakgrund och teori för arbetet. Allmänna geotekniska begrepp och beräkningsmetoder med avseende på jordars deformationsegenskaper tas upp likväl som tidsmotståndsteorin, Chalmersmodellen med kryp i Geosuite Settlement samt Eurokod 7.

### 2.1 LERANS EGENSKAPER

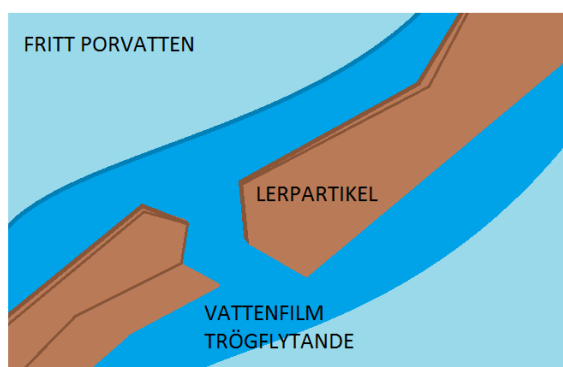
En jordart som innehåller störst andel ler benämns lera. Ler är en kornfraktion i storleksordningen 0,002 mm som tillhör fraktionsgruppen finjord. Totalt finns det sex kornfraktioner, vilka framgår av figur 1 (Larsson, 2008).

FINJORD		GROVJORD		STEN & BLOCK	
LER	SILT	SAND	GRUS	STEN	BLOCK
0,002mm	0,063mm	2mm	6,3cm	2dm	
Kohesionsjord		Mellanjord	Friktionsjord		

**Figur 1.** Kornstorlekars indelning i fraktioner och fraktionsgrupper. Figur modifierad efter Larsson (2008).

Lera har en låg permeabilitet  $k$  vilket innebär att vatten släpps igenom mediet med låg hastighet. En vanlig storleksordning på lerors permeabilitet är mindre än  $10^{-9}$  m/s (Larsson, 2008).

I finjord såsom lera förekommer repellerande och attraherande krafter, där den attraherande tar över den repellerande vid små avstånd mellan partiklarna. Den repellerande kraften uppkommer från att lerpartiklar är negativt laddade och den attraherande kraften uppkommer från bindningskraften van der Waals. Van der Waals uppkommer på grund av den trögflytande vattenfilm som omger partiklar i finjord. Även elektrostatisk bindning och vätebindning förekommer via vattenfilmen vilket stärker den attraherande kraften. Vattenfilmen innebär således att partiklarna inte behöver ha direktkontakt för att attrahera varandra, se figur 2 (Axelsson & Mattsson, 2016).



**Figur 2.** Den trögflytande vattenfilm som omger partiklar i finjord bidrar till att attraktionskrafter mellan partiklarna uppstår. Figur modifierad efter Axelsson & Mattsson (2016).

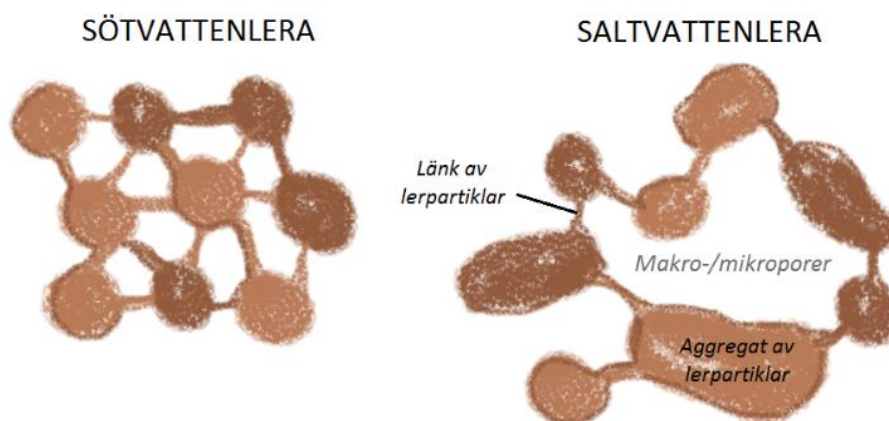
Föregående resonemang förklarar begreppet kohesionsjord, som innebär att skjuvkrafter kan överföras mellan partiklarna i finkornig jord trots att ingen normalkraft (direktkontakt) mellan partiklarna förekommer. Detta innebär att en tillförd last ökar attraktionen mellan partiklarna (Axelsson & Mattsson, 2016).

En lera har inte en homogen struktur. De minsta lerpartiklarna har mest specifik yta, vilket innebär att de är mest aktiva med avseende på attraktionskrafterna. Dessa lerpartiklar attraheras först till varandra vilka bildar aggregat som binds samman av länkar (andra lerpartiklar). Det är dessa aggregat och länkar som utgör grunden för de olika strukturerna som förekommer i lera. Hålrummen mellan aggregat och länkar kallas makro- eller mikroporer, vilka är generella uttryck för hålrum mellan alla typer av kornfraktioner (Axelsson & Mattsson, 2016). Porositeten för lera och silt varierar vanligtvis mellan 25–75 procent (Larsson, 2008).

Då leror deformeras under last är det främst hålrummen mellan länkarna som komprimeras, men de mindre hålrummen som förekommer i aggregaten kan också komprimeras (Axelsson & Mattsson, 2016). Strukturen och lerans spänningshistoria är viktigt med avseende på vilka egenskaper leran uppvisar (Larsson, 2008).

### 2.1.1 Lera avsatt från söt- och saltvatten

Lerans struktur skiljer sig åt beroende på om de avsatts med söt- eller saltvatten. Typ av vatten har betydelse för sedimentering eftersom lerpartiklar ordnar sig olika i förhållande till varandra beroende på vilken typ av attraktionskraft som dominerar. I sötvatten dominerar elektrostatisk bindning och i saltvatten dominerar sekundär valensbindning (Axelsson & Mattsson, 2016). Saltvattensleror har därigenom en mindre homogen struktur och större makroporer än sötvattensleror. Saltvattenslerors aggregat är mer tätt sammanfogade än aggregaten i sötvattensleror, se figur 3 (Larsson, 2008).



**Figur 3.** Skillnad mellan aggregat, länkar och makroporer för sötvattenavsatt lera och saltvattenavsatt lera. Figur modifierad efter Axelsson & Mattsson (2016).

## 2.2 SPÄNNING I JORD

Spänning i jord definieras som kraft dividerat med area och mäts vanligen i enheten Pascal (Pa). En jordmassas vertikala totalspänning  $\sigma$  beräknas enligt ekvation 2.1, där  $\sigma'$  är effektivspänning och  $u$  är portryck orsakat av markvatten (Axelsson & Mattsson, 2016).

$$\sigma = \sigma' + u = \gamma_d \cdot z + \gamma_w \cdot z \quad (2.1)$$

Effektivspänning motsvarar kornskelettets bärande förmåga, det vill säga jordens fasta material. Effektivspänning kan beräknas som torrtinghet  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) multiplicerat med jordlagrets djup (ekvation 2.1). En torr jordmassa har inget portryck ( $u=0$ ) vilket innebär att totalspänningen  $\sigma$  motsvaras av effektivspänningen  $\sigma'$ . Portrycket  $u$  kan beräknas som vattnets tunghet  $\gamma_w$ , motsvarande 10 kN/m<sup>3</sup>, multiplicerat med jordlagrets djup (ekvation 2.1). Markvatten har således en bärande förmåga (Axelsson & Mattsson, 2016).

Det allmänna spänningsfallet i jord beskrivs med kartesiska koordinater och definieras som ett torrt och tredimensionellt tillstånd med olika stora korn. Normalspänningar  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  och  $\sigma_z$  samt skjuvspänningar  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$  och  $\tau_{xy}$  verkar på varje korn och uppkommer till följd av normalkrafter  $N$  respektive skjuvkrafter  $T$  som verkar mellan kornen (Lambe & Whitman, 1979).

### 2.2.1 Förkonsolideringstryck

Den högsta vertikala effektivspänning som en jord har utsatts för kallas förkonsolideringstryck  $\sigma'_c$ . Förkonsolideringstrycket kan bestämmas med ödometer- eller CRS-försök baserat på Casagrandes (1936) metod. Storleken på förkonsolideringstrycket beror bland annat på uttorkning, förändring av grundvattennivån, kemiska processer samt av sekundär konsolidering och varierar normalt med djupet. Om förkonsolideringstrycket passeras uppstår deformationer av plastisk karaktär (jorden behåller det nya deformerade tillståndet). Deformationer innan förkonsolideringstrycket passeras är av elastisk karaktär (jorden återgår till tillstånd innan deformation) (Larsson, 2008).

### 2.2.2 Normal- och överkonsoliderad jord

Normalkonsoliderad jord innebär att rådande effektivspänning är den högsta spänning som jorden dittills erfarit. Överkonsoliderad jord innebär att jorden avlastats från dess högsta effektivspänning, det vill säga förkonsolideringstrycket  $\sigma'_c$  (Axelsson & Mattsson, 2016).

## 2.3 SÄTTNING

Sättning innebär att markytan sänks som följd av att underliggande jord deformeras under last. Total sättning är summan av primär sättning och sekundär sättning. Primär sättning sker direkt efter last påförts marken medan sekundär sättning (krypning) utvecklas lång tid efteråt. För att beräkna total sättning måste jordens spänningstillstånd innan tillförandet av last, lastens tillskottspänning samt jordens deformationsegenskaper kännas till (Axelsson & Mattsson, 2016).

Total sättning  $\delta_{tot}$  kan beräknas med ekvation 2.2 och är då en summa av den sättning som sker för respektive jordlager. Sättningen beräknas genom att multiplicera jordlagrets tjocklek  $z$  med töjningen  $\varepsilon$ . För primär sättning gäller primär töjning  $\varepsilon_0$  och för sekundär sättning (krypning) gäller kryptöjning  $\varepsilon_{cr}$  (Axelsson & Mattsson, 2016).

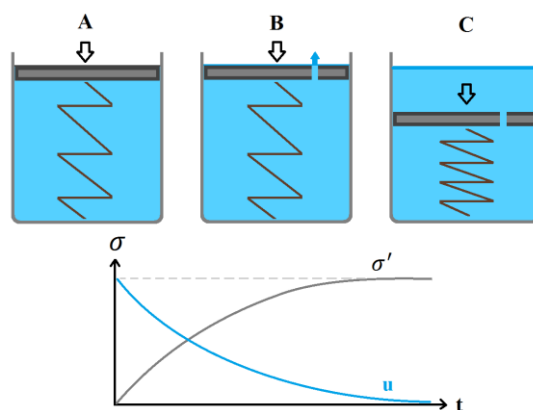
$$\delta_{tot} = \sum_{i=1}^n (z_i \cdot \varepsilon_i) = \sum_{i=1}^n (z_i \cdot (\varepsilon_{0,i} + \varepsilon_{cr,i})) \quad (2.2)$$

### 2.3.1 Primär sättning och konsolidering

Primär sättning sker för grovkornig jord momentant medan den för vattenmättad jord och finjord fördröjs av konsolidering. Konsolidering innebär att markvatten pressas ut ur jorden och att lasten som tidigare bars av markvattnet överförs till kornskelettet. Det är dock enbart kornskelettet som deformeras eftersom vatten är inkompressibelt. Ju finkornigare jord desto större betydelse får konsolideringens fördröjning, eftersom tiden för vattenavgången beror på jordens permeabilitet  $k$  (Larsson, 2008). Konsolideringen kan ta flera år innan den är avslutad och fullständig primärsättning utvecklats (Lambe & Whitman, 1979).

Figur 4 beskriver konsolidering schematiskt för en vattenmättad jord, där jordens kornskelett symboliseras av fjädern. Vid tillförandet av last bärs denna initialt av porvattnet (A). Därefter överförs lasten successivt till kornskelettet (B), vilket innebär att portrycket  $u$  minskar och att effektivspänningen  $\sigma'$  ökar enligt ekvation 2.1. Vid konsolideringens slutskede (C) har portrycket minskat till noll och den totala spänningen  $\sigma$  är lika med den effektiva spänningen  $\sigma'$  (Axelsson & Mattsson, 2016). Den totala spänningen  $\sigma$  är således konstant under hela förloppet (Lambe & Whitman, 1979).





**Figur 4.** Schematisk konsolidering där fjädern symboliserar kornskelettet. Last tillförs kornskelettet (A) och konsolideringen påbörjas (B). Efter en viss tid bär kornskelettet all last och porvattnet har pressats ut (C). Den totala spänningen är konstant under hela förloppet. Figur modifierad efter Axelsson & Mattsson (2016).

Terzaghi presenterade år 1923 en konsolideringsteori som än idag används (Axelsson & Mattsson, 2016). Teorin antar bland annat att vatten är inkompressibelt samt att deformationen sker vertikalt (Lambe & Whitman, 1979).

Enligt Terzaghis teori beror portrycket  $u$  av djupet  $z$  och tiden enligt konsolideringsekvationen 2.3. Konsolideringskoefficienten  $c_v$  beskriver jordens permeabilitet, kompressionsmodul och vattnets tunghet (Lambe & Whitman, 1979). Den allmänna lösningen till ekvation 2.3 är ekvation 2.4 (Axelsson & Mattsson, 2016) där parametern  $h$  är jordlagrets tjocklek alternativt kortast dräneringsväg (Larsson, 2008).

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{M \cdot k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{h} \int_0^{2h} u_0 \cdot \sin \frac{n\pi z}{2h} dz \right) \left( \sin \frac{n\pi z}{2h} \right) e^{-\frac{n^2 \pi^2 c_v}{4h^2} \cdot t} \quad (2.4)$$

Tid för konsolidering beräknas med ekvation 2.5 där tidsfaktorn  $T_v$  beror av konsolideringsgraden  $U$  (Larsson, 2008). Det finns framtagna samband mellan  $T_v$  och  $U$  för olika dräneringsfall som tillämpas vid beräkning av konsolideringstid (Axelsson & Mattsson, 2016).

$$t = T_v \frac{h^2}{c_v} \quad (2.5)$$

### 2.3.2 Krypsättning

Krypning eller krypsättning innebär att jorden deformeras över tiden under konstant spänning (Lambe & Whitman, 1979). Larsson (2008) delar upp krypsättning i två separata företeelser; krypsättning som orsakas av geologisk åldring samt krypsättning som orsakas av last. Den geologiska åldringen innebär att lerpartiklarna omlagras med tiden till följd av sin egetyngd samt på grund av att lerans länkar deformeras (Hansbo, 1975). Rent mekaniskt menar Axelsson och Mattson (2016) att krypningen orsakas av viskösa företeelser i den trögflytande vattenfilm som omsluter partiklar i finkornig jord.

Larsson (2008) hävdar att krypningen inträder efter konsolideringen avslutats, men det råder meningsskiljaktigheter mellan forskare (Havel, 2004). Enligt Larsson (1986) är krypningen endast av betydelse då 80 procent av förkonsolideringstrycket uppnått medan Claesson (2003) hävdar detsamma fast vid 70 procent.

## 2.4 JORDS DEFORMATIONSEGENSKAPER

För beräkning av total sättning med ekvation 2.2 måste jordens deformationsegenskaper kännas till. En sådan egenskap är sambandet mellan effektivspänning  $\sigma'$  och töjning  $\varepsilon$ , ödometermodul  $M$ . Modulen kan erhållas från ödometer- och CRS-försök och beräknas med ekvation 2.6 (Axelsson & Mattsson, 2016).

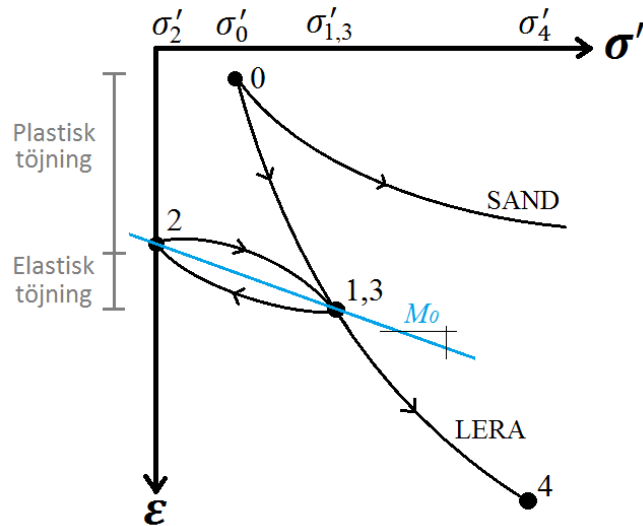
$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (2.6)$$

Vid deformationsförsök i laboratorium används små jordprover för att minimera risken att de störs av yttre omständigheter. Det är även praktiskt med små prover eftersom konsolideringsprocessen fördröjer processen varav laborationstiden förkortas (Larsson, 2008).

### 2.4.1 Ödometer

I försök med ödometer pålastas jordprov med vikter för att undersöka sambanden mellan deformation, effektivspänning och tid för olika laster. Jordprovets töjning  $\varepsilon$  (-) kan enkelt beräknas genom att dividera uppmätt deformation med provens tjocklek. För varje laststeg dubblas vikten och jordproven får konsolidera i 24 h (Axelsson & Mattsson, 2016). Figur A1 i bilaga A visar två ödometrar tillhörande Bjerking's laboratorium i Uppsala.

Figur 5 visar typkurvor för lera och sand för sambandet mellan töjning och effektivspänning. Linjen 0–1–4 är lerans pålastningskurva som erhålls för normalkonsoliderad lera. Linjen 0–1–2 visar hur normalkonsoliderad lera sväller vid avlastning i punkt 1. Förkonsolideringstrycket är i detta läge högre än den nuvarande spänningen och leran är således överkonsoliderad. Vid pålastning av den överkonsoliderade leran i punkt 2 erhålls kurvan 2–3–4. Då förkonsolideringstrycket uppnått (punkt 3) följer kurvan därefter pålastningskurvan. Även om kurvorna 1–2 och 2–3 skiljer sig åt antas detta vara linjärt, vilket markeras av en blå linje i figuren. Denna lutning beskrivs av kompressionsmodulen  $M_0$  (Axelsson & Mattsson, 2016).



**Figur 5.** Exempel på typkurvor för sand och lera som erhålls från ödometerförsök som påvisar sambandet mellan effektivspänning och töjning. Lerans kurva visar även vad som sker vid av- och pålastning. Figur modifierad efter Axelsson & Mattsson (2016).

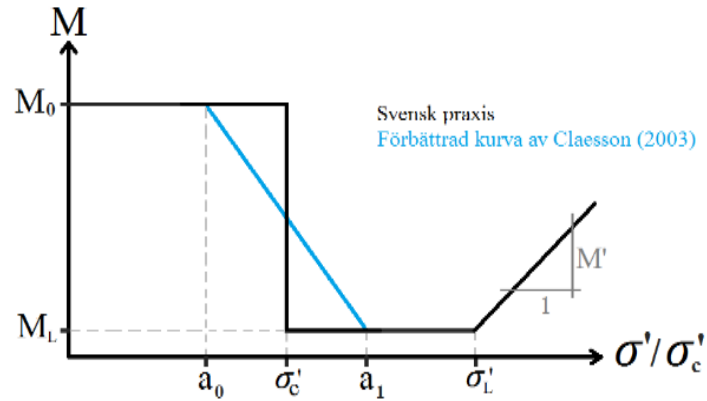
Primär töjning för normalt konsoliderad och överkonsoliderad lera beräknas med ekvation 2.7 respektive 2.8, där  $m$  är kompressionsmodultalet som beskriver sambandet mellan effektivspänning och kompressionsmodulen. För dessa ekvationer beaktas dock ingen krypning (Axelsson & Mattsson, 2016).

$$\varepsilon_{NC} = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{OC} = \frac{\sigma'_c - \sigma'_2}{M_0} + \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_4}{\sigma'_c} \quad (2.8)$$

#### 2.4.2 CRS

CRS (Constant Rate of Strain) är en tidseffektiv variant av ödometer som främst används på kohesionsjord. CRS utsätter jordproven för en konstant töjningshastighet (istället för vikter) för att undersöka sambandet mellan töjning  $\varepsilon$  och effektivspänning  $\sigma'$  (Axelsson & Mattsson, 2016). Vid CRS-försök erhålls parametrarna tid, last, deformation och portryck. Sambandet mellan töjning och effektivspänning beskrivs av kompressionsmodulen  $M$ , se figur 6. Modulen  $M_L$  utvärderas vid gränstrycket  $\sigma'_L$  och lutningen  $M'$  utvärderas baserat på sambandet mellan effektivspänning och modul (Larsson, 2008).



**Figur 6.** Ödometermodul enligt svensk praxis samt förbättrad version av Claesson (2003). Figur modifierad efter Claesson (2003) samt Axelsson & Mattsson (2016).

Primär töjning för överkonsoliderad jord beräknas med ekvation 2.9 för CRS-försök. Ingen krypning beaktas (Axelsson & Mattsson, 2016).

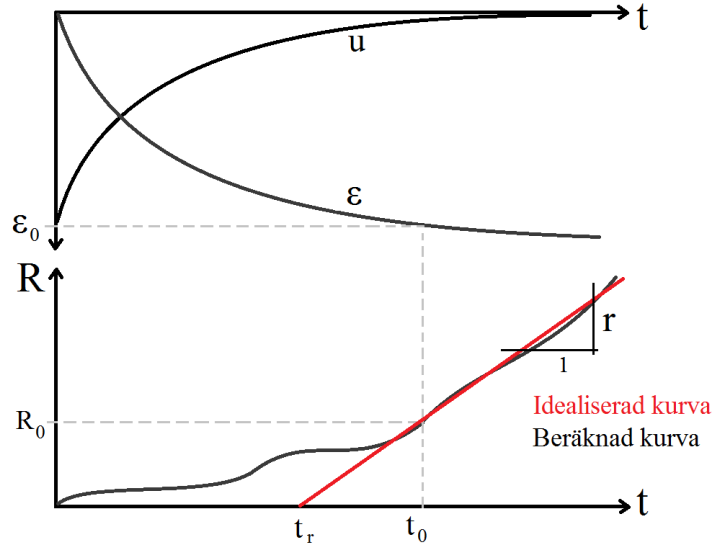
$$\varepsilon_{OC} = \frac{\sigma'_c - \sigma'_0}{M_0} + \frac{\sigma'_L - \sigma'_c}{M_L} + \frac{1}{M'} \ln \left[ 1 + (\sigma'_1 - \sigma'_L) \frac{M'}{M_L} \right] \quad (2.9)$$

## 2.5 KRYPNING MED TIDSMOTSTÅNDSTEORIN

År 1969 presenterade Janbu tidsmotståndsteorin som beskriver krypning som en respons av tiden. Ju längre tid som passerar desto större krypning utvecklas, men kryphastigheten minskar med tiden. Tidsmotståndet  $R$  beräknas enligt ekvation 2.10 baserat på uppmätt samband mellan tid och töjning från ödometerförsök (Janbu, 1969).

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \quad (2.10)$$

Figur 7 (nedre) visar sambandet mellan tidsmotståndet  $R$  och tid som erhålls baserat på resultat från ödometerförsök. Figur 7 (övre) visar sambandet mellan töjning och tid som erhållits med ödometer. Krypning under ödometerförsöket påbörjas då  $R:t$ -kurvan blir linjär. Detta indikeras av tiden  $t_0$  och tidsmotståndet  $R_0$ . Konsolideringen har därmed avslutats och porövertrycket går mot noll. Den räta linjens lutning är kryptalet  $r$  och den idealiserade kurvans intercept med tidsaxeln markerar referenstiden  $t_r$ . Från  $R:t$ -kurvan erhålls således tre kryppparametrar; referenstiden  $t_r$ , tid för krypning  $t_0$  samt kryptal  $r$  (Olsson, 2010).



**Figur 7.** Samband mellan töjning  $\varepsilon$ , tidsmotstånd  $R$  och logaritmerad tid. Efter tiden  $t_0$  sker ren krypning. Figur modifierad efter Svanö m.fl. (1991).

Det linjära sambandet som erhålls då ren krypning sker (efter tiden  $t_0$ ) beskrivs av ekvation 2.11 och kryptalet  $r$  definieras av ekvation 2.12. Om kryptalet  $r$  erhålls till över 10 000 är krypningen väldigt liten och troligtvis försumbar (Olsson, 2010).

$$R = r(t - t_r) \quad (2.11)$$

$$r = \frac{dR}{dt} \quad (2.12)$$

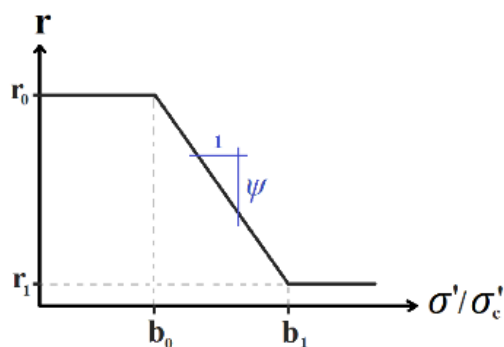
De tre kryppparametrarna  $r$ ,  $t_0$  och  $t_r$  krävs för att beräkna kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$  (-) med ekvation 2.13 samt den totala töjningen  $\varepsilon_{tot}$  med ekvation 2.14. Töjningen  $\varepsilon_0$  är den primära töjning som skett innan kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$ . Tidsmotståndet  $R$  beskrivs även med ekvation 2.15 som är en invertering av ekvation 2.14 (Olsson, 2010).

$$\varepsilon_{cr} = \int_{t_0}^t \frac{dt}{R} = \frac{1}{r} \ln \left( \frac{t-t_r}{t_0-t_r} \right) \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{cr} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} \ln \left( \frac{t-t_r}{t_0-t_r} \right) \quad (2.14)$$

$$R = R_0 \cdot e^{r(\varepsilon_{tot} - \varepsilon_0)} \text{ om } \varepsilon_{tot} \geq \varepsilon_0 \quad (2.15)$$

Kryptalets,  $r$ , teoretiska samband med effektivspänning  $\sigma'$  framgår av figur 8. Till en början är kryptalet konstant  $r_0$  men efter tillräcklig hög effektivspänning uppnåtts minskar kryptalet linjärt med lutningen  $\psi$  till  $r_l$ . Lutningen och spänningsgränserna definieras med faktorerna  $b_0$  och  $b_l$  (Olsson, 2010).



**Figur 8.** Kryptalets  $r$  samband med effektivspänning. Figur modifierad efter Svanö m.fl. (1991).

## 2.6 CHALMERSMODELLEN MED KRYP

Chalmersmodellen med kryp är en endimensionell modell i programmet Geosuite (Settlement) som ägs av Novapoint. Modellen används för att beräkna förändring av portryck och total deformation över tiden och inkluderar krypning (Novapoint, 2016).

### 2.6.1 Parametrar till modellen

Vid tillämpning av Chalmersmodellen med kryp krävs sammanställda parametrar i tabell 1, där parametrarna  $t_r$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $r_0$  och  $r_1$  är krypparametrar (Novapoint, 2016).

**Tabell 1.** Parametrar till Chalmersmodellen med kryp i Geosuite Settlements

Beteckning	Beskrivning	Enhet
$t_r$	Referenstid	s
$b_0$	Faktor $\leq 1$	-
$b_1$	Faktor $\geq 1$	-
$r_0$	Kryptal fram till $b_0$	-
$r_1$	Kryptal efter $b_1$	-
$M_0$	Modul innan $\sigma_c'$	kPa
$M_L$	Modul mellan $\sigma_c'$ och $\sigma_L'$	kPa
$M'$	Kompressionsmodultal	-
$\sigma_c'$	Förkonsolideringstryck	kPa
$\sigma_L'$	Gränstryck	kPa
$a_0$	Faktor $\leq 1$	-
$a_1$	Faktor $\geq 1$	-
$\gamma_d$	Skrymtunghet	kN/m <sup>3</sup>

### 2.6.2 Teorin bakom modellen

Chalmersmodellen med kryp baseras på Aléns (1998) modell som tillämpar tidsmotståndsteorin samt Terzhagis konsolideringsteori. Modellen beaktar följande med avseende på total deformation:

- A. Konsolidering;
- B. Elastisk-plastisk deformation;
- C. Krypning (Olsson, 2010).

Konsolideringen (A) regleras av permeabiliteten  $k$  och beräknas med ekvation 2.16. Den elastiska-plastiska deformationen (B) regleras av ödometermodulen  $M$  och beräknas med ekvation 2.17. Kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$  regleras av kryptalet  $r$  och beräknas med ekvation 2.18 (Claesson, 2003).

$$\frac{\partial \varepsilon_{tot}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} = -\frac{1}{M} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{R} = \frac{1}{r(t-t_r)} \quad (2.18)$$

Den totala töjningen  $\varepsilon_{tot}$  är summan av den elastisk-plastiska töjningen  $\varepsilon_0$  och kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$  enligt ekvation 2.19. Detta innebär att ekvationerna 2.16, 2.17 och 2.18 kan skrivas om till ekvation 2.20 som ger förändringen av den totala töjningen med tiden. Ekvationerna 2.16, 2.17 och 2.18 kan även kombineras till ekvation 2.21 för att beskriva förändringen av portrycket med tiden (Claesson, 2003).

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{cr} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{tot}}{\partial t} = -\frac{1}{M} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r(t-t_r)} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{M \cdot k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r(t-t_r)} \quad (2.21)$$

Genom att sätta in ekvation 2.22 i ekvation 2.21 erhålls ekvation 2.23. Denna ekvation skrivs om på finit differensform för att lösas med den finita elementmetoden (FEM) (Claesson, 2003).

$$R = -r \cdot t_r \cdot e^{r \cdot \varepsilon_{cr}} = -r \cdot t_r \cdot e^{r \left( \varepsilon_{tot} + \frac{\Delta u}{M} \right)} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = M \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial z} u \right) \right] + \frac{1}{-r \cdot t_r \cdot e^{r \left( \varepsilon_{tot} + \frac{\Delta u}{M} \right)}} \right] \quad (2.23)$$

Modellen beräknar kryptalet,  $r$ , enligt ekvation 2.24 och ödometermodulen  $M$  enligt ekvation 2.25 (Novapoint, 2016). En förbättrad kurva över ödometermodulen  $M$  enligt figur 6 tillämpas, framtagen av Claesson (2003).

$$r = \begin{cases} r_0, & \sigma' \leq b_0 \sigma'_c \\ r_0 + (r_1 - r_0) \frac{\sigma' - b_0 \sigma'_c}{b_1 \sigma'_c - b_0 \sigma'_c}, & b_0 \sigma'_c < \sigma' < b_1 \sigma'_c \\ r_1, & \sigma' \geq b_1 \sigma'_c \end{cases} \quad (2.24)$$

$$M = \begin{cases} M_0, & \sigma' < a_0 \sigma'_c \\ M_0 + (M_L - M_0) \frac{\sigma' - a_0 \sigma'_c}{a_1 \sigma'_c - a_0 \sigma'_c}, & a_0 \sigma'_c \leq \sigma' < a_1 \sigma'_c \\ M_L, & a_1 \sigma'_c \leq \sigma' < \sigma'_L \\ M_L + M'(\sigma' - \sigma'_L), & \sigma' \geq \sigma'_L \end{cases} \quad (2.25)$$

## 2.7 UTVÄRDERING AV KRYPPARAMETRAR

Kryppparametrar listade i tabell 1 kan erhållas från laborationsförsök eller med empiriska samband (Olsson, 2010). I följande avsnitt beskrivs hur kryppparametrar kan utvärderas från CRS-försök, ödometerförsök samt från empiriska samband.

### 2.7.1 Från CRS-försök

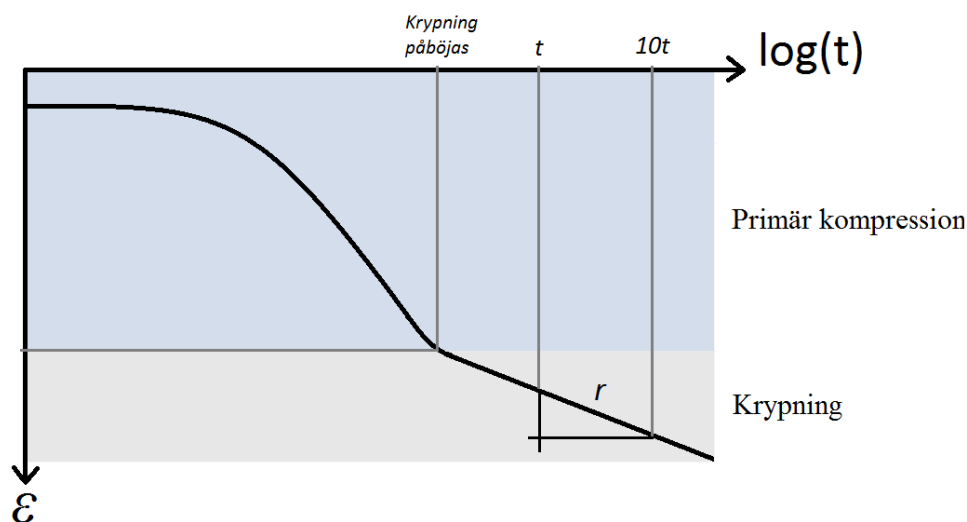
Det är svensk standard att utvärdera  $M_0$ ,  $M_L$ ,  $M'$ ,  $\sigma'_L$  och  $\sigma'_c$  från CRS-försök. Enligt Claesson (2003) är faktorerna  $a_0$  och  $a_1$  som erhålls från modulkurvor vanligtvis 0,8 respektive 1,0. Faktor  $a_0$  bör enligt teori vara mindre eller lika med 1 och faktor  $a_1$  större eller lika med 1 (Novapoint, 2016).

Ekvation 2.26 kan användas för att beräkna kryptalet  $r$  från CRS-försök. Finska lerors koefficient  $B$  hade ett värde av 0,073. Huruvida denna ekvation lämpar sig för svenska leror är inte fastställt (Claesson, 2003).

$$r = \frac{M(\sigma')}{\sigma' \cdot B} \quad (2.26)$$

### 2.7.2 Från ödometerförsök

Kryppparametrar kan erhållas från försök med ödometer enligt figur 7 i avsnitt 2.5 (Olsson, 2010). Kryptalet  $r$  kan även erhållas från sambandet mellan töjning  $\varepsilon$  och logaritmerad tid, som också erhålls från försök med ödometer enligt figur 9. Ren krypning antas ske då kurvan blir linjär (Larsson, 2008).



**Figur 9.** Resultat från ett laststeg med ödometer där krypning antas ske då kurvan blir linjär. Tiderna  $t$  och  $10t$  indikerar en logcykel. Figur modifierad efter Das (2010) samt Lambe & Whitman (1979).

Kryphastigheten beräknas med ekvation 2.27 baserat på kurvan i figur 9 för en logcykel (det vill säga mellan två tiopotenser, markerade i figur 9 som tidsförloppen mellan  $t$  och  $10t$ ) (Lambe & Whitman, 1979).



$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \log(t)} = \frac{1}{r} \quad (2.27)$$

Krypningen i figur 9 kan beskrivas av andra parametrar, däribland koefficienten för sekundär kompression  $\alpha_s$ . Sambandet mellan kryptalet  $r$  och  $\alpha_s$  framgår av ekvation 2.28 (Olsson, 2010).

$$\alpha_s = \frac{\ln 10}{r} \quad (2.28)$$

### 2.7.3 Från empiriska samband

I brist på laborationsresultat kan empiriska samband tillämpas för att erhålla kryppparametrarna  $t_r$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  och  $r$ .

#### 2.7.3.1 Referenstid $t_r$

Referenstiden  $t_r$  kan anges till 24 h i brist på annan information, eftersom försök med ödometer generellt påvisat att krypning inträtt efter denna tid. Krypningen kan dock överskattas om ett för kort tidförlopp väljs (Olsson, 2010).

#### 2.7.3.2 Faktorer $b_0$ och $b_1$

Faktorn  $b_1$  (som bör vara större eller lika med 1) är vanligtvis mellan 1,0–1,1 (Claesson, 2003). Faktor  $b_0$  (som bör vara mindre eller lika med 1) kan beräknas med ekvation 2.29. Förkortningen OCR i ekvationen står för "Over Consolidation Ratio" och definieras som högst uppnådda spänning dividerad med nuvarande spänning (Olsson, 2010).

$$b_0 = OCR^{-1} = \frac{\sigma'_0}{\sigma'_c} \quad (2.29)$$

#### 2.7.3.3 Kryptal $r$

För spänningssituationer över förkonsolideringstrycket ( $\sigma'_0 + \Delta\sigma \geq \sigma'_c$ ) kan kryptalet  $r_1$  beräknas med ekvation 2.30, där  $w_N$  är vattenkvot (Larsson, et al., 1997). Ytterligare ett samband för att beräkna  $r_1$  presenterades av Mesri och Gdlewski (1977), se ekvation 2.31 (Olsson, 2010).

$$r_1 = \frac{75}{w_N^{1,5}} \quad (2.30)$$

$$r_1 = \frac{M_L}{(0,04 \pm 0,01) \cdot \sigma'_c} \quad (2.31)$$

För spänningssituationer under förkonsolideringstrycket ( $\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_c$ ) presenterade Olsson och Alén (2009) ekvation 2.33 för beräkning av kryptalet  $r_0$ . Referensspänningen  $\sigma_{ref}$  beräknas med ekvation 2.32 och lutningen  $\psi$  väljs mellan 2 000–3 000. För spänningssituationer över förkonsolideringstrycket ( $\sigma'_0 + \Delta\sigma \geq \sigma'_c$ ) kan ekvation 2.33 förenklas till ekvation 2.34 för beräkning av  $r_0$  (Olsson, 2010).

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma'_c}{1,35} \quad (2.32)$$

$$r_0 = \psi \cdot \frac{(\sigma'_c \cdot b_1 - \sigma_{ref}) \cdot (b_1 - b_0)}{\sigma'_0 + \Delta\sigma - \sigma_{ref}} + r_1 \quad \text{om } \sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_c \cdot b_1 \quad (2.33)$$

$$r_0 = \psi \cdot (b_1 - b_0) + r_1 \quad (2.34)$$

## 2.8 KRYPNING I EUROKOD

Eurokoder togs fram av Europeiska kommissionen och Europeiska frihandelssammanslutningen med syftet att bidra till utveckling av Europas byggmarknad samt för att homogenisera säkerhetsnivåer inom byggbranschen (European Commission, u.d.). Första januari år 2011 blev det lag för Sverige att gå över från Boverkets konstruktionsregler (BKR) till Eurokoder (Boverket, u.d.). I Sverige betraktas innehållet i de engelska versionerna av Eurokoder som svensk standard (SS). För att underlätta för svenska användare har Swedish Standard Institute (SIS) översatt dessa till svenska samt kompletterat med nationella val (Sveriges Standardiseringsförbund, u.d.). Det är dock alltid de engelska originalversionerna som gäller vid meningsskiljaktigheter (European Commission, u.d.).

I Eurokoder är det viktigt att skilja *principer* från *råd*. Principerna ska betraktas som krav, definitioner, allmänna formuleringar eller analytiska modeller beroende på sammanhang. Rådets syfte är att uppfylla föreliggande principer samt att ge exempel på generell erkända regler. I Eurokoder är det tillåtet att bruka alternativ till råden, förutsatt att resultaten visar på samma säkerhet, brukbarhet och beständighet. Det är däremot inte tillåtet att bruka andra alternativ för principerna (SISa, 2010).

Det finns tio Eurokoder som används vid dimensionering av bärande konstruktioner och som samtliga innehåller normativa hänvisningar till andra dokument som klassas som standarder (Boverket, 2013). Eurokod 0 behandlar grundläggande information för resterande Eurokoder. Eurokod 7 behandlar dimensionering av geokonstruktioner och innefattar två delar:

- Eurokod 7 – Del 1: Allmänna regler;
- Eurokod 7 – Del 2: Markundersökning och provning (European Commission, u.d.).

Till särskilda kapitel i Eurokod 7 finns tillämpningsdokument framtagna av Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik (IEG) (Svenska Geotekniska Föreningen, 2016).

## 2.8.1 Eurokod 7

### 2.8.1.1 Del 1: Allmänna regler

I Eurokod 7 del 1 framgår det att krypning bör beaktas i olika stor grad beroende på geokonstruktion och dimensioneringsfall. I kapitel två (grunder för geoteknisk dimensionering) framgår principerna att samtliga dimensioneringsfall skall genomföras med ett långt tidsperspektiv i beaktning samt att en lasts varaktighet skall beaktas. Detta eftersom tidseffekter kan påverka finkornig jords deformation. Ytterligare en princip innebär att tolkning av resultat från provbelastningar och modellförsök ska ta tidseffekter i beaktning (SISa, 2010).

Kapitel sex (plattgrundläggning) fastställer principen att långtidssättningar skall beaktas vid dimensionering och kapitlet råder utövaren att använda allmänt erkända metoder vid beräkning av krypning (SISa, 2010). Enligt ett tillämpningsdokument från IEG krävs en särskild utredning med avseende på krypning för plattgrundläggning i kohesionsjord (IEGa, 2008). Utöver detta bör krypning beaktas enligt kapitel sju (pålgrundläggning), kapitel nio (stödkonstruktioner), kapitel elva (totalstabilitet) samt kapitel tolv (bankar) (SISa, 2010). Ett tillämpningsdokument från IEG styrker att jordens krypegenskaper ska beaktas vid dimensionering i bruksgränstillståndet (IEGb, 2008).

### 2.8.1.2 Del 2: Markundersökning och provning

I kapitel fem (laboratorieprov på jord och berg) hänvisar en princip till gällande standard ISO TS 17892-5. Detta dokument är standard för kompressabilitets- och deformationsprov på jord. I samma kapitel framgår rådet att krypsättning kan beräknas med sekundär kompressionskoefficient  $\alpha_s$  som erhålls från ödometerförsök. Bilaga X hänvisar till utdaterad standard SS027129 som beskriver hur krypsättning kan beräknas från ödometerförsök (SISb, 2010). Officiellt är ISO TS 17892-5 det ersättande dokumentet för SS027129, men det framgår inte av Eurokod 7 (ISO, u.d.).

## 2.8.2 SS027129

Enligt den numera utdaterade standarden SS027129 beräknas krypdeformationen  $\varepsilon_{cr}$  enligt ekvation 2.35 baserat på försök med ödometer, där  $\alpha_s$  är koefficienten för sekundär kompression. Krypning antas ske från den tidpunkt  $\varepsilon:\log(t)$ -kurvan bli linjär. Koefficienten  $\alpha_s$  definieras som den linjära kurvans lutning mellan en logcykel (SIS, 1991).

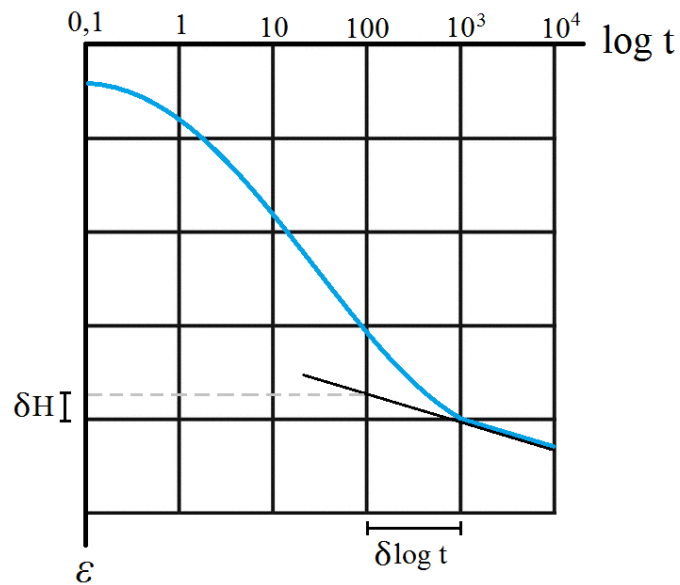
$$\varepsilon_{cr} = \alpha_s \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.35)$$

## 2.8.3 ISO TS 17892-5

Denna gällande standard beskriver hur den sekundära konsolideringskoefficienten  $C_a$  erhålls från försök med standardödometer. Enligt standarden kan  $C_a$  beräknas enligt ekvation 2.36.

$$C_a = \frac{\delta H}{H_i} \cdot \frac{1}{\delta \log t} \quad (2.36)$$

Figur 10 förtydligar hur beräkningen med ekvation 2.36 skall användas, där  $H_i$  är lerprovets ursprungliga höjd innan nytt laststeg och  $\delta H$  är deformationen av lerprovet över en logcykel (ISO, 2004).



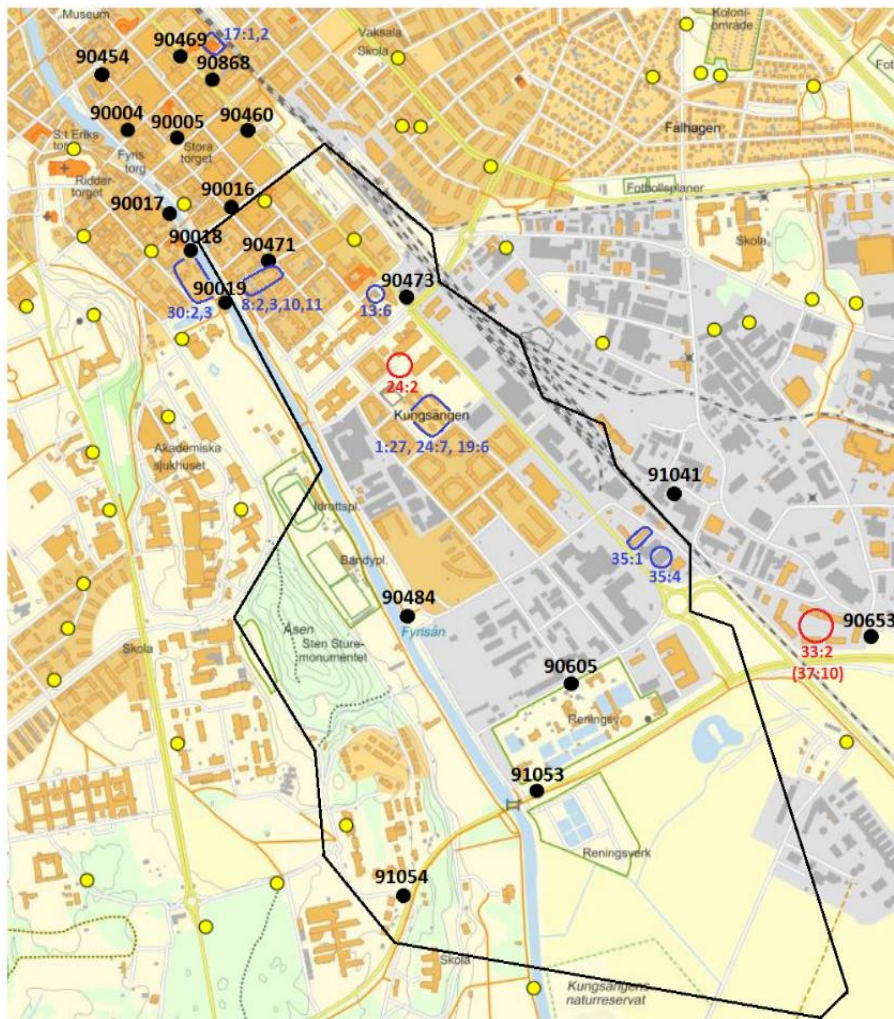
**Figur 10.** Hur koefficienten för sekundär konsolidering utvärderas från ödometerförsök enligt svensk standard. Figur modifierad efter ISO TS 17892-5 (2004).

### 3. METOD

I detta kapitel beskrivs det geografiska område arbetet berört samt från vilka punkter relevant data hämtats. Kapitlet behandlar även metodiken med avseende på samtliga frågeställningar.

#### 3.1 OMRÅDET KUNGSÄNGEN

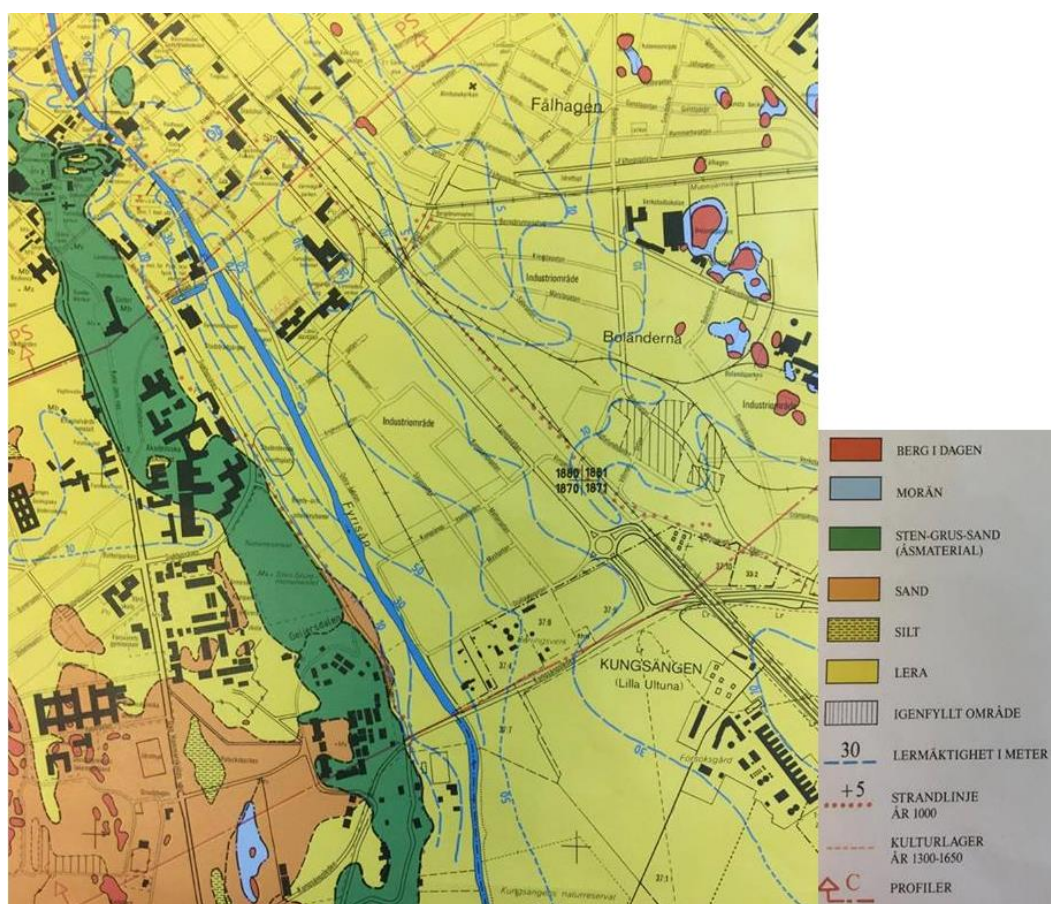
Arbetet avgränsades till området Kungsängen i Uppsala men inkluderar även data från angränsande platser (Bjerking, 2018). Kungsängen markeras i figur 11 och avgränsas förenklat av Fyrisån, järnvägen, Bangårdsgatan och Kungsängsleden (Google Maps, 2018). De svarta punkterna i figuren är fixpunkter vars höjdavvägningar användes för utvärdering av verklig krypsättning. De gula punkterna är fixpunkter som inte användes. De blå områdena visar fastigheter, vars dubbavvägningar användes för utvärdering av verklig krypsättning. Lerprover hämtades från två fastigheter vilka framgår av de två röda områdena.



**Figur 11.** Området Kungsängen framgår av den svarta linjen. De två röda ringarna är fastigheter där lerprover togs till ödometerförsök. De blå områdena är fastigheter med dubbar vars höjdavvägningar användes i arbetet. De svarta punkterna är fixpunkter vars höjdavvägningar användes i arbetet. Figur modifierad efter Bjerking (2018).



Kungsängen domineras av postglacial och glacial lera och angränsar rullstensåsen som består av åsmaterial. De största lermäktigheterna återfinns i närheten av Fyrisån. Av figur 12 framgår lerans mäktighetskurvor för området samt jordarter (Bjerking, 1988).



**Figur 12.** Mäktighetskarta över Kungsängen och centrum. Blå linjer anger lermäktighet i meter och gul färg visar lera, Bjerking (1988).

### 3.2 UPPMÄTT KRYPSÄTTNING

För att utröna Kungsängens krypsättning genomfördes ett arkivsök i Bjerking's arkiv för att finna lämplig data; höjdavvägningar från dubbar och fixpunkter. Höjdavvägningarna för dubbar har tagits fram av Bjerking medan höjdavvägningarna för fixpunkter förvaltas av Uppsala kommun.

Höjdavvägningar för dubbar begränsades till de dubbar fastsatta på byggnader grundlagda på rust, sula eller kallmur. Höjdavvägningar på byggnader grundlagda på trä- och betongpålar användes inte i arbetet. I bilaga B tabell B1–B4 sammanställs samtliga höjdavvägningar för dubbar och fixpunkter som användes i arbetet. Totalt har 18 mätningar för både dubbar och fixpunkter använts. Dessa användes för att ta fram tre typer av grafer:

- Krypsättning mot antal år (dubbdata);
- Krypsättning mot antal år (fixpunktsdata);
- Normaliserad krypsättning mot antal år (både dubb- och fixpunktsdata).

Normaliserad krypsättning definieras som krypsättning dividerat med lerdjup. Lerdjupet hämtades från äldre uppdrag tillhandahållna av Bjerking alternativt uppskattades från mäktighetskurvor (figur 12). Byggnaders byggår fastställdes med boken *Uppsalas byggnader* (Lundberg, 1992). Denna information var väsentlig för att utröna om höjdavvägningarna indikerade krypsättning eller inte.

Regressions- och korrelationsanalys genomfördes för kurvorna. Mätningens tidslängd och lerdjup betraktades som orsaker bakom krypsättning och normaliserad krypsättning. Huruvida mätserierna var normalfördelade undersöktes med Shapiro Wilkinsons test i programmet *R* (R-Project, u.d.).

För att ytterligare påvisa krypsättning över tiden undersöktes kvarteret Gudrun mer detaljerat. En kurva med krypsättning mot tiden togs fram för fixpunkt 90471 samt för två dubbar. Dubb 37 på fastighet Kungsängen 8:11 (uppdrag 28012, Bjerking) och dubb 8 på fastighet Kungsängen 8:2 (uppdrag 55039, Bjerking) valdes för ändamålet. Därefter utfördes Mann–Kendall test i Excel för att verifiera om det fanns en signifikant trend över tiden. Om p-värdet var mindre än 0,05 förkastades nollhypotesen varav det antogs finnas en signifikant trend över tiden (Miljöstatistik, u.d.).

Kryphastighet och relativ krypsättning beräknades för dubbdata och fixpunktsdata. Relativ krypsättning anger andelen av den totala lermäktigheten som kryper per år. Den relativa krypsättningen erhöles genom att dividera den totala krypsättningen med underliggande lermäktighet och sedan slå ut det över antal år som mätningen varade. Kryphastigheten beräknades genom att dividera den totala krypsättningen med mätningens längd i antal år.

### **3.3 BERÄKNAD KRYPSÄTTNING**

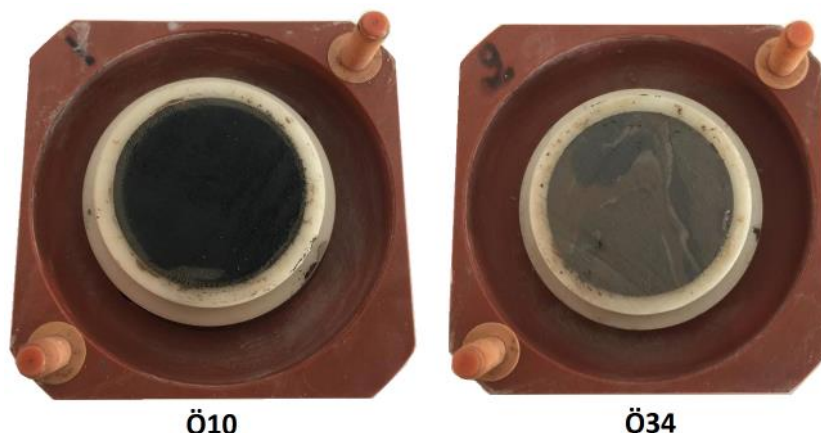
#### **3.3.1 Tidsmotståndsteorin**

Kryptöjningen (och därigenom krypsättningen) beräknades med tidsmotståndsteorin baserat på utvärderade kryppparametrar från två ödometerförsök. Det ena försöket var från år 1978 och det andra försöket genomfördes i samband med detta arbete år 2018.

Försöket från år 1978 innehöll data över tid och deformation för sex laststeg; 0–11,5, 11,5–26, 26–55, 55–113, 113–230 samt 230–460 kPa. Försöket baserades på lerprover från fastighet Kungsängen 33:2 (år 1978 dåvarande fastighet Kungsängen 37:10) belägen i utkanten av Kungsängen (figur 11). Tre lerprover från 4, 8 och 14 m djup undersöktes (Ö4, Ö8 och Ö14). Lerprovets initiala höjd var 20 mm och dess diameter 50 mm.

Det andra försöket genomfördes i samband med arbetet år 2018 för sju laststeg; 0–20, 20–40, 40–80, 80–160, 160–320, 320–640 samt 640–1 280 kPa. Försöket baserades på lerprover från fastighet Kungsängen 24:2 (figur 11). Försöket utfördes i Bjerkingens laboratorium mellan den 3 och 11 april av arbetets författare. Två lerprover undersöktes från 10 och 34 m djup (Ö10 och Ö34). Försöket genomfördes utan av- och pålastning

eftersom det inte var relevant för arbetet. Figur 13 visar lerprov Ö10 och Ö34 innan försöken påbörjades. Lerprovets initiala höjd var 20 mm och dess diameter var 50 mm.



Figur 13. Lerprov Ö10 och Ö34 från fastighet, Kungsängen 24:2.

Tabell 2 sammanställer typ av lera för respektive lerprov. Nomenklaturen har förändrats sedan år 1978 varav olika beteckningar förekommer.

Tabell 2. Sammanställning av lerprover och lertyper från olika djup och fastigheter i Kungsängen

Fastighetsbeteckning (Kungsängen)	Lerprov	Beteckning	Förklaring
33:2	Ö4		Grå postglacial lera
33:2	Ö8		Varvig lera med inslag av siltskikt
33:2	Ö14		Varvig lera med inslag av siltskikt
24:2	Ö10	[clGy]	Svart lerig gyttja
24:2	Ö34	[siCl]	Brungrå siltig lera

Kryppparametrarna  $r$ ,  $t_0$  och  $t_r$  utvärderades från ödometerförsöken med hjälp av kurvorna:

- Tidmotstånd  $R$  (s) mot tid (s);
- Töjning  $\varepsilon$  (-) mot tid (s);
- Töjning  $\varepsilon$  (-) mot logaritmerad tid (s).

Erhållen data från ödometerförsöken som användes för framtagandet av kurvorna finns sammanställda i bilaga A i tabell A1–A5. Töjningen  $\varepsilon$  (-) erhöles genom att dividera uppmätt deformation från ödometerförsöken med lerprovets tjocklek, motsvarande 20 mm. Tidmotståndet  $R$  beräknades enligt ekvation 2.10 med hjälp av erhållen data. Från  $R:t$ -kurvan utvärderades kryptalet  $r$ , det vill säga kurvans lutning då den blev linjär. Tiden  $t_0$  utvärderades från tidsaxeln då kurvan blev linjär och referenstiden  $t_r$  beräknades som den idealiserade kurvans skärning med tidsaxeln (se avsnitt 2.5 figur 7). Från  $\varepsilon:t$ -kurvan kunde  $\varepsilon_0$  utvärderas men kurvan var främst ett stöd vid utvärdering av ovan nämnda kryppparametrar.

Erhållna kryppparametrar  $r$ ,  $t_0$  och  $t_r$  användes för att beräkna kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$  enligt ekvation 2.13 för olika antal år, för respektive lerprov och laststeg. Kryptöjningen



beräknades för 1–200 år och därefter beräknades krypsättningen genom att multiplicera kryptöjningen med erhållna lermäktigheter för vattenmättad lera, enligt ekvation 2.2.

Grafer över krypsättning mot lerdjup togs fram genom att beräkna vad respektive effektivspänning från ödometerförsöken motsvarade i tjocklek för vattenmättad lera enligt ekvation 3.1 (baserad på ekvation 2.1). Torrtungheten  $\gamma_d$  för lera valdes till 17 kN/m<sup>3</sup> och tungheten för vattnet  $\gamma_w$  till 10 kN/m<sup>3</sup>. Med ekvation 3.1 beräknades således vad trycken 11,5, 23, 55, 113, 230 samt 460 kPa från ödometerförsöken motsvarade i lagertjocklek för vattenmättad lera. Grundvattenytan betraktades således vara vid marknivån. Dessa lerdjup utgjorde x-axeln i grafen för lerprov Ö4, Ö8 och Ö14. Samma beräkning genomfördes sedan för lerprov Ö10 och Ö34 men då för trycken 20, 40, 80, 160, 320, 640 samt 1 280 kPa.

$$z = \frac{\sigma'}{\gamma_d - \gamma_w} \quad (3.1)$$

### 3.3.2 Empiriska samband

Kryptalen  $r_0$  och  $r_1$  beräknades från empiriska samband med ekvation 2.30, 2.31 samt 2.34 för lerprov Ö10. Ekvation 2.33 kunde inte beräknas på grund av avsaknad av data för jordens nuvarande jordtryck ( $\Delta\sigma' + \sigma'_c$ ) varav den förenklade ekvationen 2.34 tillämpades istället. Parametrarna till ekvationerna erhöles från laboratorieförsök med CRS och ödometer. Dessa försök utfördes av Bjerking år 2018 och de utvärderade parametrarna finns sammanställda i bilaga C, tabell C1. Parametrarna  $\psi$ ,  $b_1$  och  $b_0$  uppskattades till 3000, 1,1 respektive 1,0 baserat på teoretiska värden från litteraturstudien.

### 3.3.3 Eurokod 7

För att besvara frågeställning 2 gällande krypning i Eurokod 7 genomfördes en litteraturstudie där Eurokod 7 och dess tilläggsdokument ingick. Inga metodiker eller teorier från Eurokod 7 fanns att tillgå och således genomfördes inga beräkningar.

## 3.4 MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT

För att modellera ödometerförsök med Chalmersmodellen med kryp krävdes parametrar från både CRS- och ödometerförsök (se tabell 1). Lerprov Ö10 från fastighet Kungsängen 24:2 valdes till modelleringsobjekt eftersom det var det enda lerprovet med tillgång till all nödvändig data.

Permeabilitetsmodellen *log based strain* valdes baserat på vilka parametrar arbetet hade tillgång till, i detta fall permeabilitet  $k$  samt  $\beta_k$  som erhöles från utförda CRS-försök. Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp valdes som jordmodeller till olika simuleringar. I modellen definierades jordprovet som en kvadrat med sidor av storleksordning 25 mm samt med djupet 20 mm för att efterlikna ödometerförsökets uppställning. Lerans tunghet definierades till 17 kN/m<sup>3</sup>.

Tabell 3 tabulerar parametrar till modellen för lerprov Ö10 samt beskriver varifrån parametrarna utvärderades. Faktorerna  $b_0$  och  $b_1$  kunde inte utvärderas varav teoretiska värden 1,0 respektive 1,1 valdes enligt rekommendation från Claesson (2003).

**Tabell 3.** Sammanställning av parametervärden utvärderade från ödometer, CRS och teori för lerprov Ö10 som användes för simuleringar med modellen

Parameter	Ö10	Utvärderad från
$M_0$	3200	CRS
$M_L$	630	CRS
$M'$	8	CRS
$a_0$	0,82	CRS
$a_1$	1,30	CRS
$\sigma'_c$	92	CRS
$\sigma'_L$	135	CRS
$t_r$	-0,00054	Ödometer
$b_0$	1,0	Teori
$b_1$	1,1	Teori
$r_0$	2118	Ödometer
$r_1$	96	Ödometer
$k_{init}$	0,0158	CRS
$\beta_k$	0,6	CRS

Därefter modellerades samma laster som i ödometerförsöket (20, 40, 80, 160, 320 samt 640 kPa) för lerprovet under 24 h med Chalmersmodellen med kryp samt med Chalmersmodellen utan kryp. Detta gav upphov till kurvor visande lerprovets deformation mot tiden för respektive last. Resultaten från modelleringen kunde därefter jämföras med resultaten från ödometerförsöket genom att sammanställa resultaten från ett laststeg i samma graf.

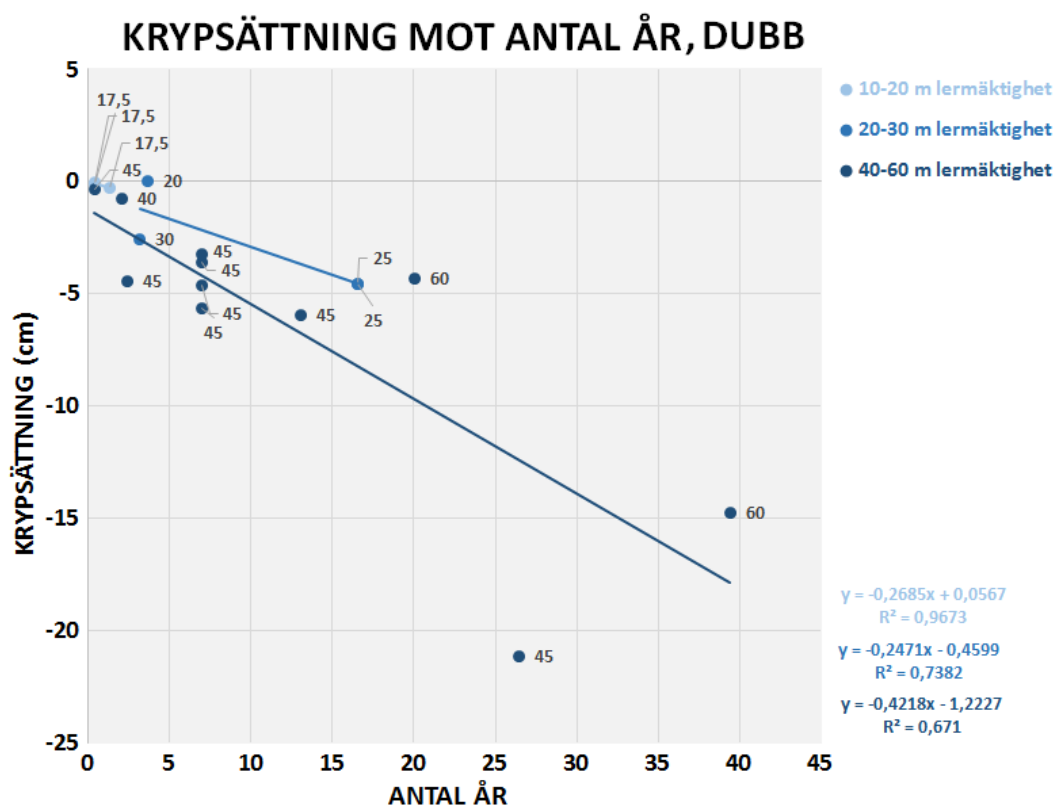
## 4. RESULTAT

I detta kapitel presenteras de mest relevanta resultat som erhöles vid besvarande av arbetets fyra frågeställningar.

### 4.1 UPPMÄTT KRYPSÄTTNING

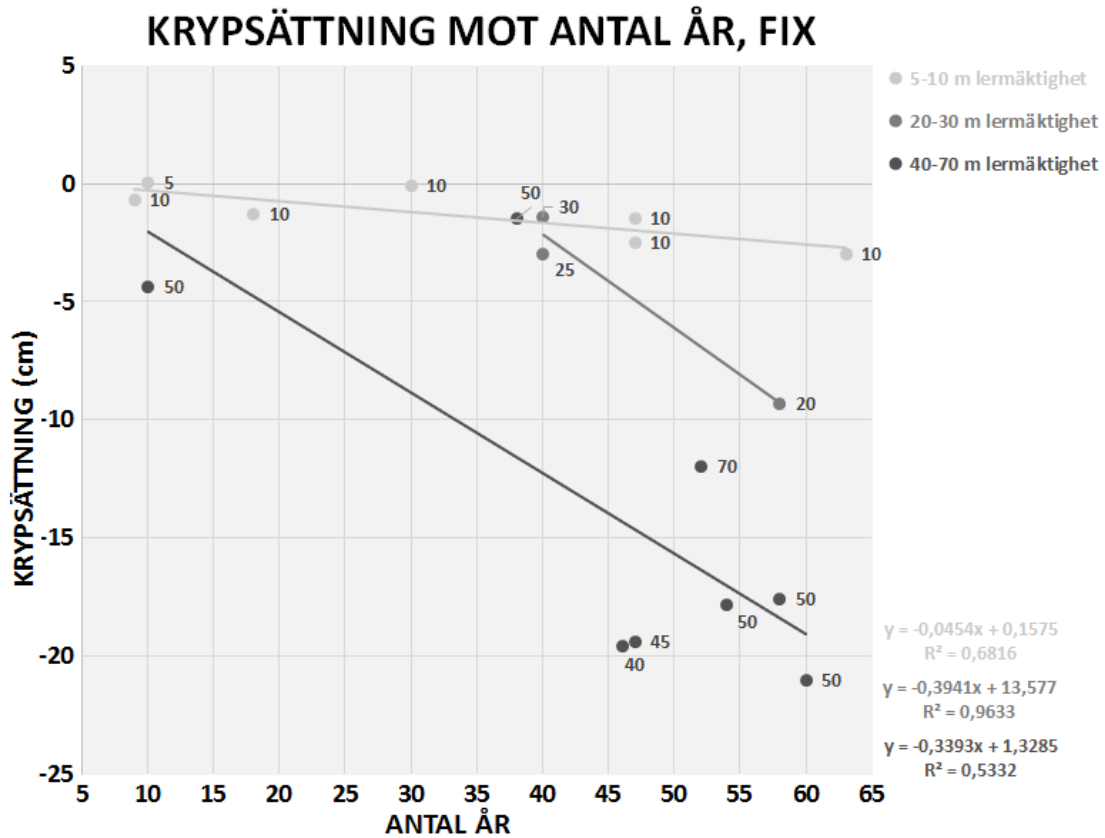
Dataserierna över krypsättning, lermäktighet och normaliserad krypsättning för dubb- och fixpunktsdata var icke normalfördelade med Shapiro Wilkinsons test.

Figur 14 visar krypsättning (höjdavvägningar för dubbar) mot mätningens längd med signifikant korrelation (Kendalls korrelation:  $\tau = -0,63$ ,  $n=18$ ,  $p<0,05$ ). Det linjära sambandet för 40–60 m lermäktighet visar en till synes brantare lutning än det linjära sambandet för 20–30 m lermäktighet. De olika lermäktigheternas krypsättning efter 1, 10, 50, 100, 150 och 200 år finns sammanställda i bilaga B, tabell B1.



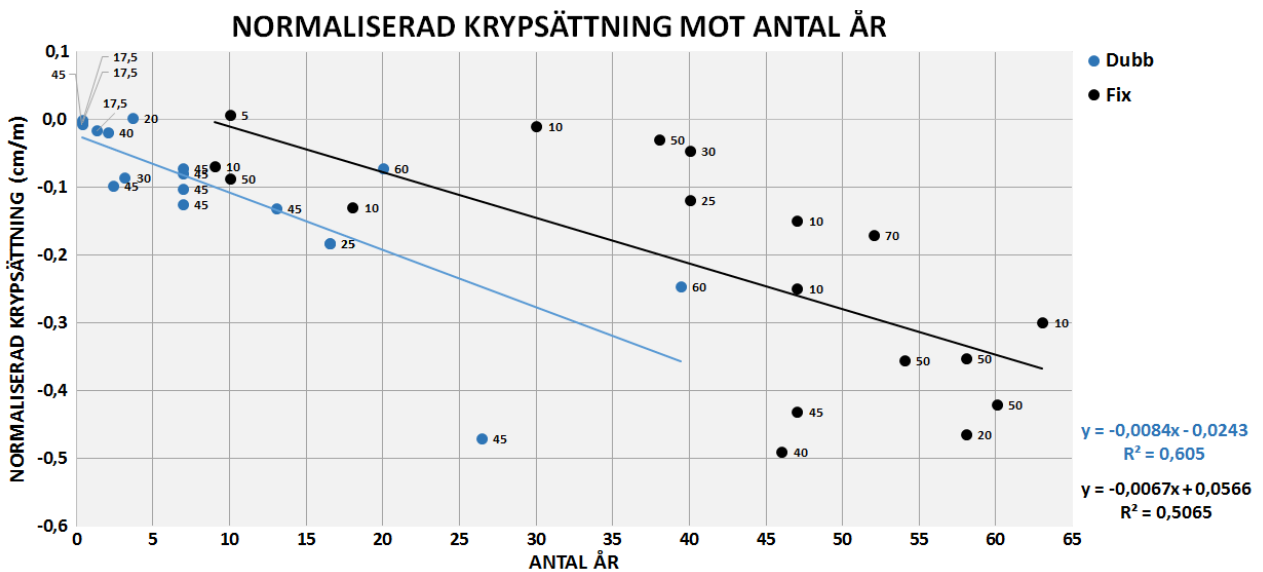
**Figur 14.** Krypsättning mot mätningarnas tidslängd för dubbar. Datapunkterna är för dubb avvägningar av flera dubbar på olika fastigheter. Dataetiketterna indikerar lermäktighet för respektive punkt i meter.

Figur 15 visar krypsättning (höjdavvägningar för fixpunkter) mot mätningens längd med signifikant korrelation (Kendalls korrelation:  $\tau = -0,38$ ,  $n=18$ ,  $p<0,05$ ). Det linjära sambandet för 5–10 m lermäktighet visar en till synes lägre lutning än de övriga lermäktigheternas linjära samband. Det linjära sambandet för 20–30 m lermäktighet hade ett högt  $m$ -värde (krypsättningen är inte noll vid tiden noll). De olika lermäktigheternas krypsättning efter 1, 10, 50, 100, 150 och 200 år finns sammanställda i bilaga B, tabell B1.



**Figur 15.** Krypsättning mot lermäktighet för fixpunkter. Datapunkterna är för fix endast avvägning av en fixpunkt. Dataetiketterna indikerar lermäktighet för respektive punkt i meter.

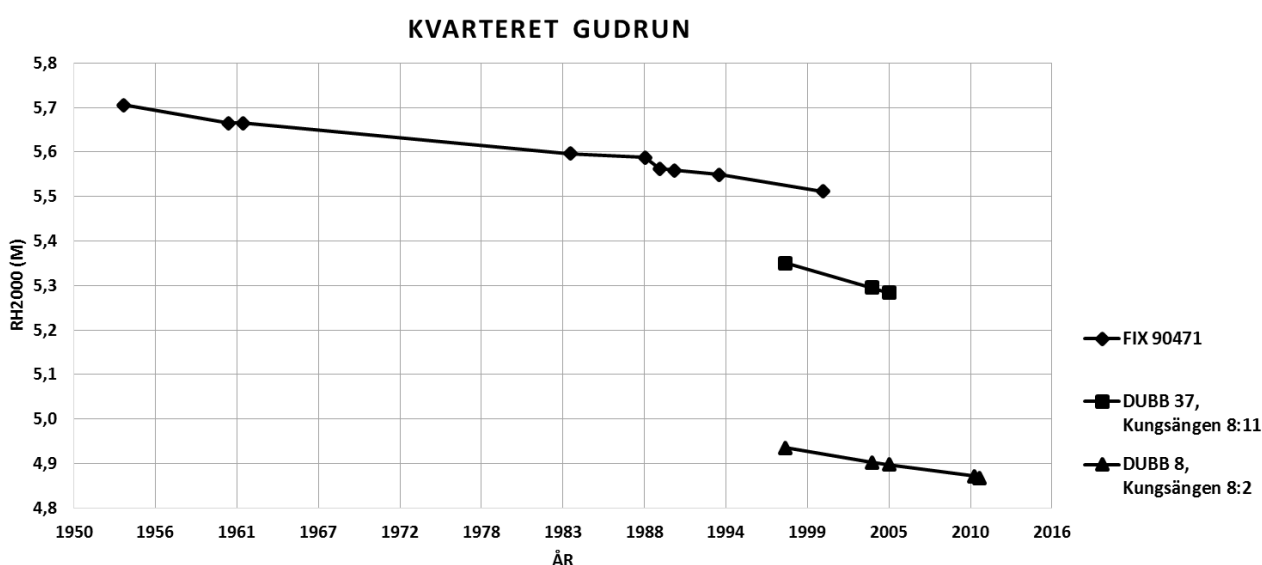
Figur 16 visar normaliserad krypsättning (krypsättning dividerat med lermäktighet) för dubbar och fixpunkter mot antal år. Det fanns en signifikant korrelation för dubbdata (Kendalls korrelation:  $\tau = -0,66$ ,  $n=18$ ,  $p<0,05$ ) och fixpunktsdata (Kendalls korrelation:  $\tau = -0,43$ ,  $n=18$ ,  $p<0,05$ ).



**Figur 16.** Normaliserad krypsättning mot mätningens tidslängd för dubbar och fixpunkter. Datapunkterna är för dubb avvägningar av flera dubbar på olika fastigheter och för fix endast avvägning av en fixpunkt. Dataetiketterna indikerar lermäktighet för respektive punkt i meter.

Fler resultat finns sammanställda i bilaga B i tabell B2 och B3, däribland kryphastighet och relativ krypsättning. Medelvärdet av relativ krypsättning för dubbdata erhöles till 0,134 promille av lermäktigheten per år, respektive 0,067 promille/år för fixpunktsdata. Medelvärdet av kryphastigheten för dubbdata erhöles till 5,2 mm/år, respektive 2,0 mm/år för fixpunktsdata.

Figur 17 visar krypsättning mot tiden för kvarter Gudrun. Fixpunkt 90471 hade över 47 år satts cirka 20 cm och uppvisade en signifikant trend över tiden (Mann–Kendall test:  $n=9$ ,  $p<0,05$ ). Dubb 37 på fastighet Kungsängen 8:11 hade över 7 år satts cirka 7 cm (Mann–Kendall test:  $n=3$ ,  $p>0,05$ ) och dubb 8 på fastighet 8:2 hade över 13 år satts cirka 7 cm (Mann–Kendall test:  $n=5$ ,  $p>0,05$ ). Dubbarna uppvisade ingen signifikant trend med tiden på grund av för få mätningar. Byggnaden med dubb 37 byggdes år 1883 och byggnaden med dubb 8 byggdes år 1865.



**Figur 17.** Höjdavvägning för fixpunkt 90471 samt dubb 37 på fastighet Kungsängen 8:11 och dubb 8 på fastighet Kungsängen 8:2 belägna i kvarteret Gudrun.

Tabell 4 sammanställer numeriska värden för den uppmätta krypsättningen i figur 17 samt vad det motsvarar i kryphastighet.

**Tabell 4.** Numeriska värden för krypsättning av punkter i kvarteret Gudrun, baserad på figur 17

	Fix 90471	Dubb 37	Dubb 8
<b>Antal år</b>	47	7	13
<b>Krypsättning (cm)</b>	19,4	6,6	6,7
<b>Kryphastighet (mm/år)</b>	4,1	9,4	5,2

## 4.2 BERÄKNAD KRYPSÄTTNING

I följande avsnitt presenteras beräknad krypsättning enligt tidsmotståndsteorin samt erhållna resultat från ödometerförsök och empiriska samband.

### 4.2.1 Tidsmotståndsteorin

Tabell 5 sammanställer utvärderade kryppparametrar för lerproven Ö4, Ö8 och Ö14. Kryppparametrar från laststeget 0–11,5 kPa kunde inte utvärderas eftersom division med noll erhöles vid beräkning av tidsmotståndet  $R$ .

**Tabell 5.** Erhållna kryppparametrar för respektive lerprov och last som användes för att beräkna krypsättning för fastighet Kungsängen 33:2

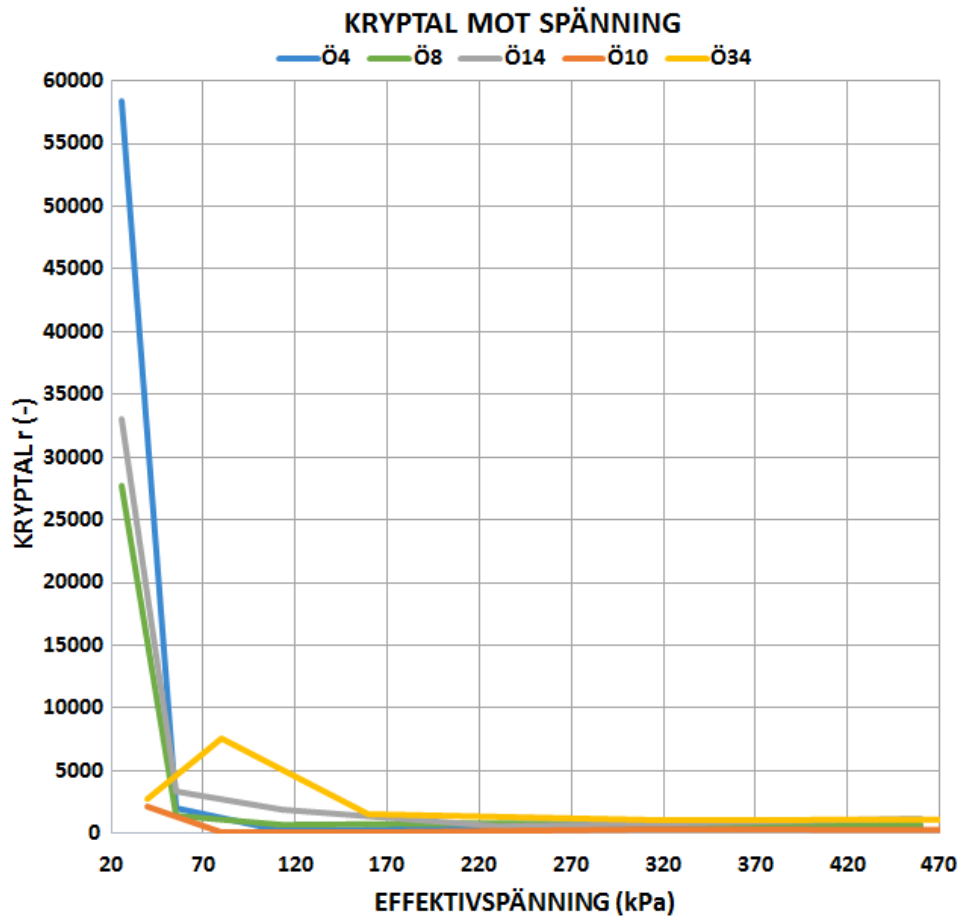
Lerprov	Laststeg (kPa)	$t_r$ (s)	$t_0$ (s)	$r$ (-)
Ö4	11,5–26	1 713	2 500	58 373
	26–55	– 979	3 600	2 036
	55–113	1 207	2 500	203
	113–230	5 738	11 940	457
	230–460	774	3 600	495
Ö8	11,5–26	2 520	2 500	27 782
	26–55	– 2 165	3 600	1 431
	55–113	1 358	2 500	691
	113–230	7 467	12 120	838
	230–460	1 104	3 600	735
Ö14	11,5–26	2 426	2 500	32 982
	26–55	1 085	3 600	3 328
	55–113	1 917	2 500	1 863
	113–230	7 989	11 760	517
	230–460	4 614	3 600	1 163

Tabell 6 sammanställer utvärderade kryppparametrar för lerproven Ö10 och Ö34. Kryppparametrar från laststeget 0–20 kPa kunde inte utvärderas eftersom division med noll erhöles vid beräkning av tidsmotståndet  $R$ . Kryppparametrar från laststeget 640–1 280 kPa kunde inte utvärderas på grund av mätfel med sensor. Lerproven Ö10 och Ö34 hade totalt deformerats 7,2 respektive 2,5 mm, vilket motsvarar en procentuell förändring av 36 respektive 12,5 %. Vid lasten 40 kPa hade 43 % av förkonsolideringstrycket (92 kPa) erhållits och efter lasten 80 kPa hade 87 % av förkonsolideringstrycket erhållits.

**Tabell 6.** Erhållna kryppparametrar för respektive lerprov från fastighet Kungsängen 24:2 samt för respektive laststeg

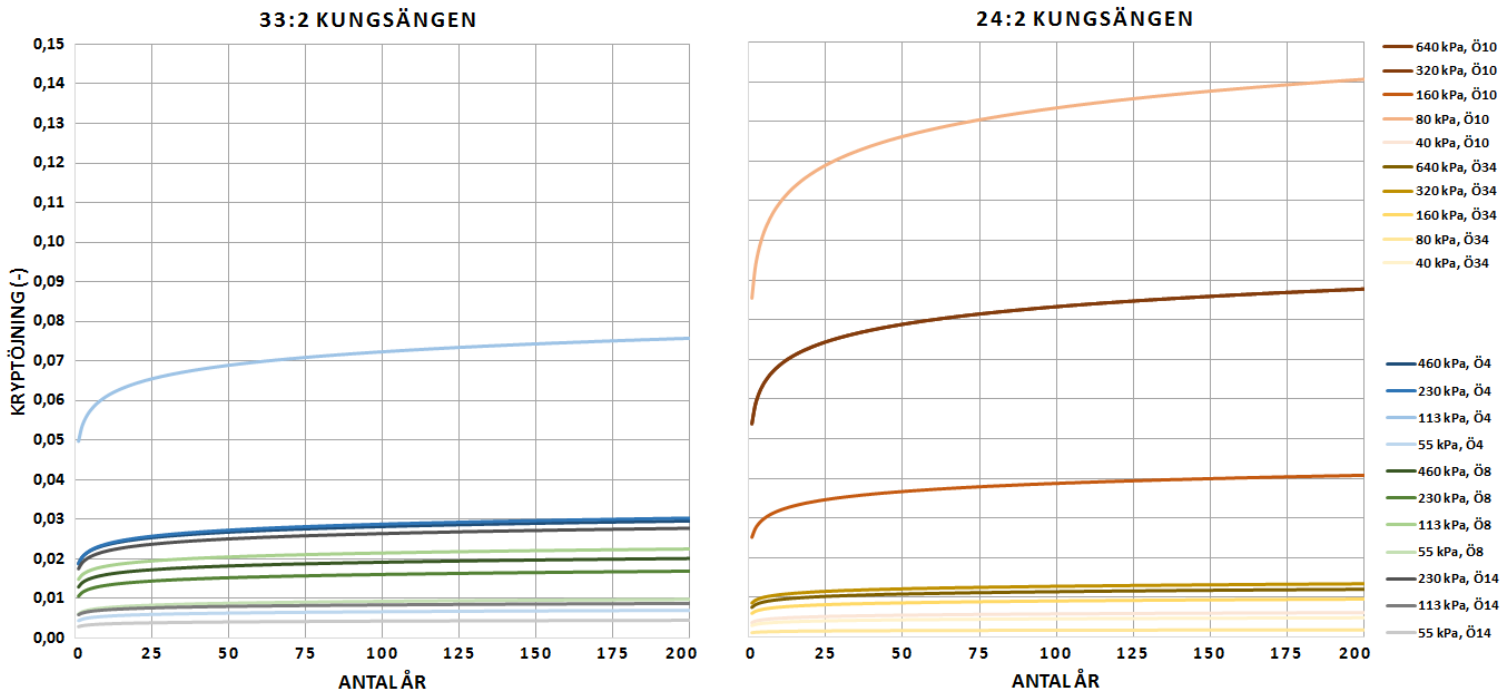
Lerprov	Laststeg (kPa)	$t_r$ (s)	$t_0$ (s)	$r$ (-)
Ö10	20–40	4 721	18 000	2 118
	40–80	– 169 033	18 000	118
	80–160	365	9 000	96
	160–320	11 784	18 000	339
	320–640	1 843	9 000	156
Ö34	20–40	7 315	18 000	2 734
	40–80	26 238	32 400	7 622
	80–160	4 721	9 000	1 483
	160–320	6 400	9 000	1 094
	320–640	4 269	9 000	1 171

Figur 18 visar kryptalen  $r$  som utvärderades för respektive last för lerprov Ö4, Ö8 och Ö14 (tabell 5) samt lerprov Ö10 och Ö34 (tabell 6). Lerprov Ö34 uppvisade inte ett teoretiskt beteende (se avsnitt 2.5 figur 8). Numeriska värden finns sammanställda i bilaga D, tabell D1.



**Figur 18.** Utvärderade kryptal  $r$  för respektive laststeg för lerproven Ö4, Ö8, Ö14, Ö10 samt Ö34.

Kryptöjningen  $\varepsilon_{cr}$  (-) varierade beroende på lerprov och last (figur 19). Generellt uppvisade lägre laster en lägre kryptöjning och högre laster en större kryptöjning. Kryptöjningens hastighet avtog med tiden. Kryptöjningen för lerprov Ö14 kunde inte beräknas för lasten 460 kPa eftersom  $t_0 < t_r$  (se avsnitt 2.5 ekvation 2.13). Lerprov Ö10 hade störst kryptöjning och lerprov Ö34 minst för samtliga laster. Beräknade värden för kryptöjning och krypsättning finns sammanställda i bilaga D, tabell D2.



Figur 19. Beräknad kryptöjning för respektive lerprov och för respektive last.

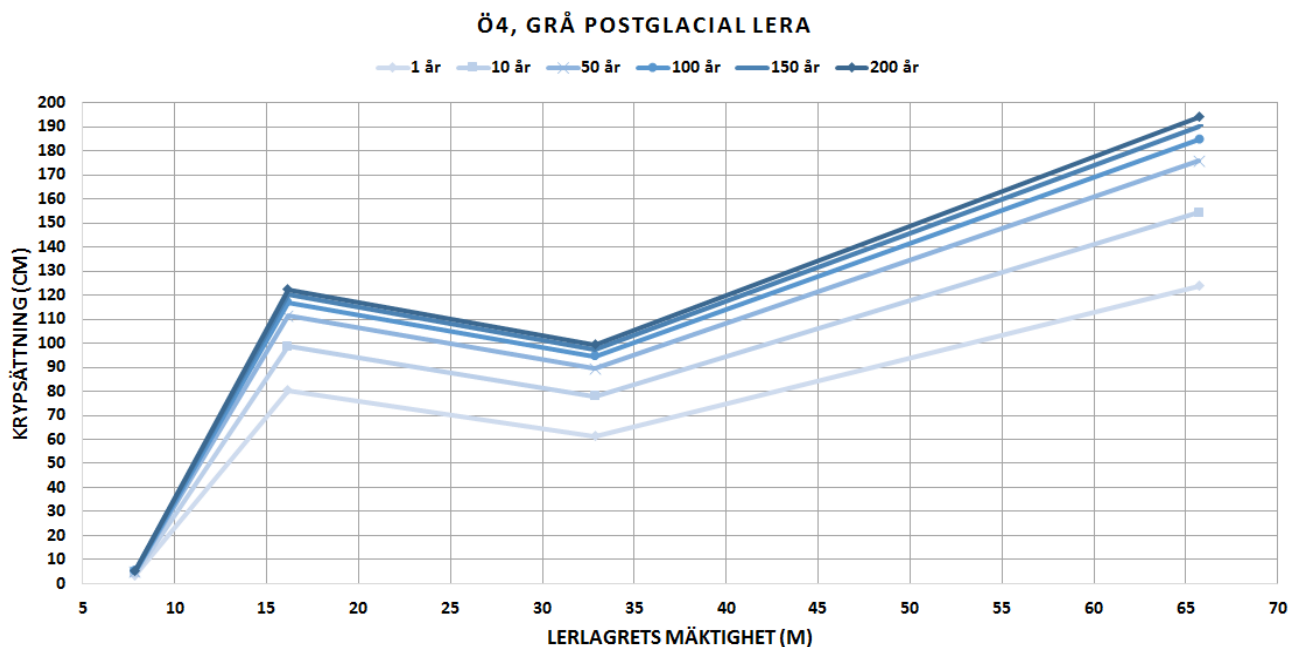
Tabell 7 sammanställer vad lasterna i ödometerförsöken motsvarar i vattenmättad lermäktighet om lerans tunghet är  $17 \text{ kN/m}^3$ .

Tabell 7. Vad lasterna från ödometerförsöken motsvarar i mäktighet av vattenmättad lera

Last (kPa)	40	55	80	113	160	230	320	460	640
Uppskattad lermäktighet (m)	6	8	11	16	23	33	46	66	91

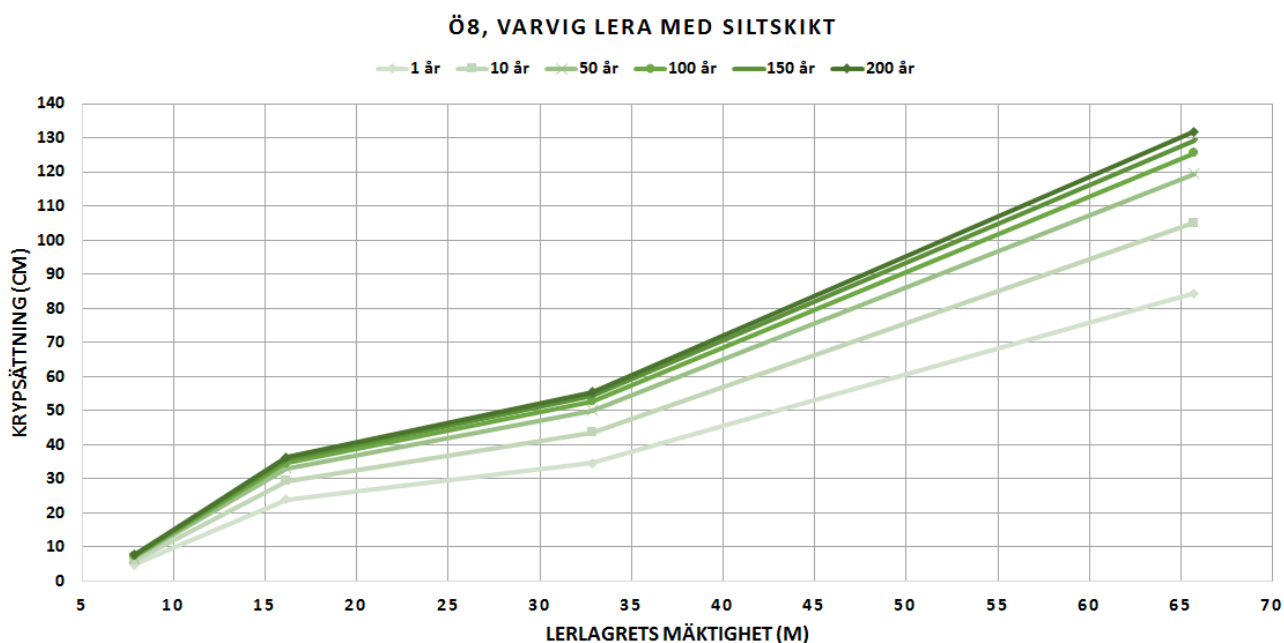


Lerprov Ö4 erhöill generellt ökande krypsättning med ökande tid och lermäktighet (eller last) enligt figur 20. Som minst erhöills 5 cm krypsättning för 8 m lermäktighet efter 1 år och som mest erhöills 195 cm krypsättningen för 66 m lermäktighet efter 200 år. Att krypsättningen minskar med ökande lermäktighet beror på utvärderade kryppparametrar.



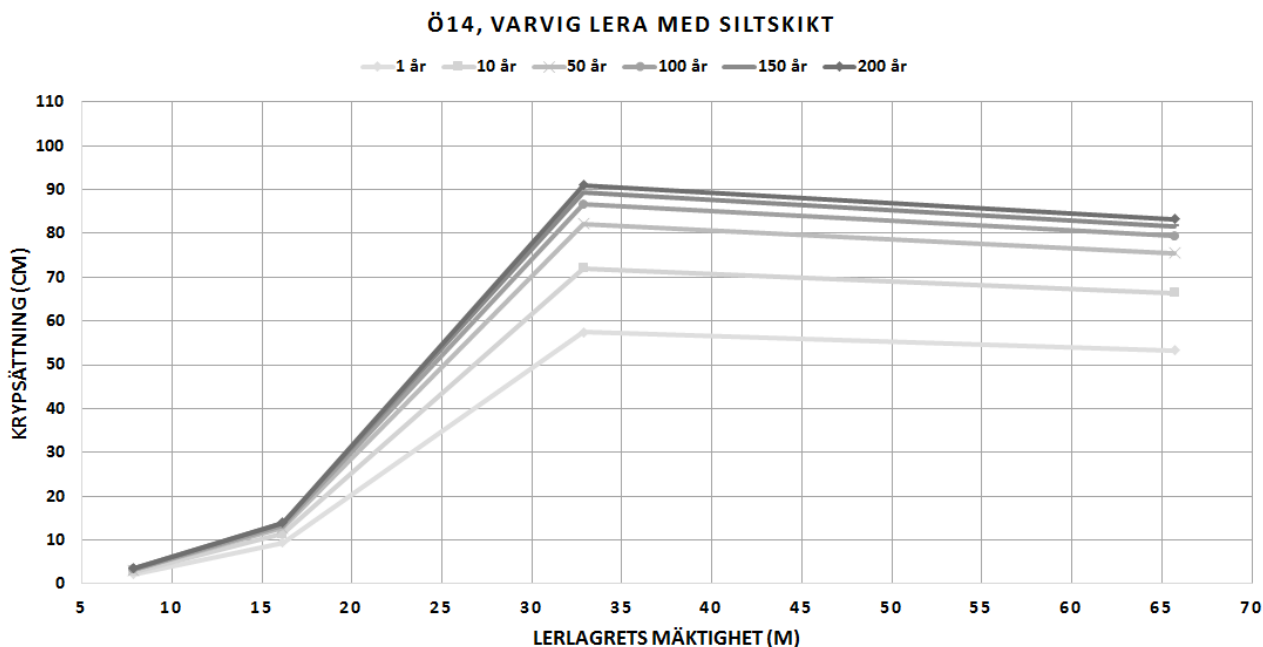
**Figur 20.** Beräknad krypsättning mot den lermäktighet som en last enligt tabell 7 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö4.

Lerprov Ö8 erhöill ökande krypsättning med ökande tid och lermäktighet (eller last) enligt figur 21. Som minst erhöills 5 cm krypsättning för 8 m lermäktighet efter 1 år och som mest erhöills 130 cm krypsättningen för 66 m lermäktighet efter 200 år.



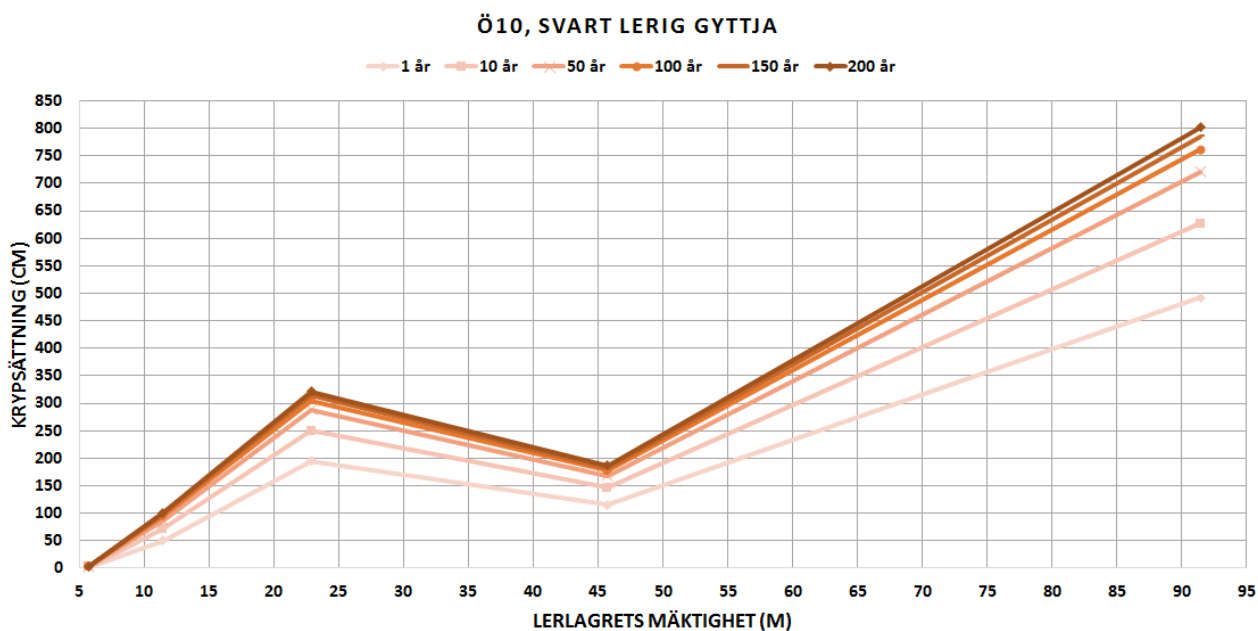
**Figur 21.** Beräknad krypsättning mot den lermäktighet som en last enligt tabell 7 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö8.

Lerprov Ö14 erhöill generellt ökande krypsättning med ökande tid och lermäktighet (eller last) enligt figur 22. Som minst erhöills 3 cm krypsättning för 8 m lermäktighet efter 1 år och som mest erhöills 92 cm krypsättning för 33 m lermäktighet efter 200 år. Att krypsättningen minskar med ökande lermäktighet beror på utvärderade kryppparametrar.



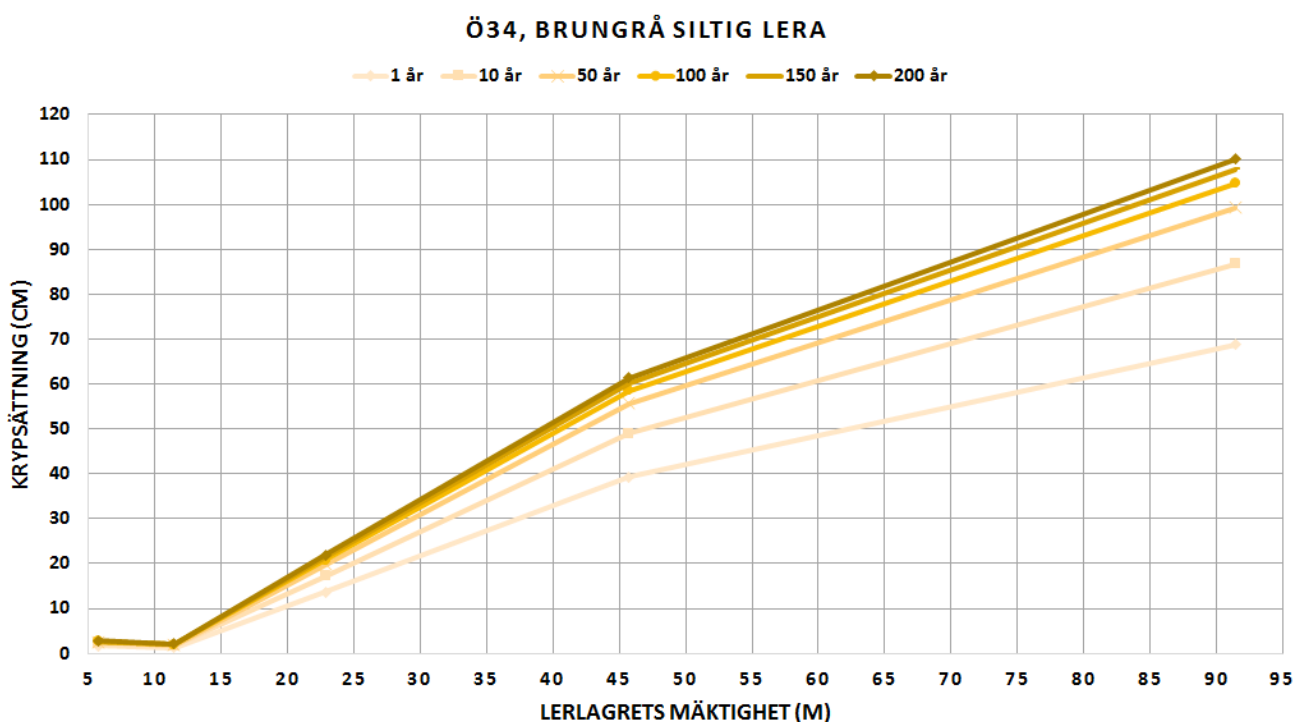
**Figur 22.** Beräknad krypsättning mot den lermäktighet som en last enligt tabell 7 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö14.

Lerprov Ö10 erhöill generellt ökande krypsättning med ökande tid och lermäktighet (eller last) enligt figur 23. Som minst erhöills 5 cm krypsättning för 6 m lermäktighet efter 1 år och som mest erhöills 800 cm krypsättningen för 91 m lermäktighet efter 200 år. Att krypsättningen minskar med ökande lermäktighet beror på utvärderade kryppparametrar.



**Figur 23.** Beräknad krypsättning mot den lermäktighet som en last enligt tabell 7 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö10.

Lerprov Ö34 erhöill ökande krypsättning med ökande tid och lermäktighet (eller last) enligt figur 24. Som minst erhöills 3 cm krypsättning för 6 m lermäktighet efter 1 år och som mest erhöills 110 cm krypsättning för 91 m lermäktighet efter 200 år.



**Figur 24.** Beräknad krypsättning mot den lermäktighet som en last enligt tabell 7 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö34.

#### 4.2.2 Empiriska samband

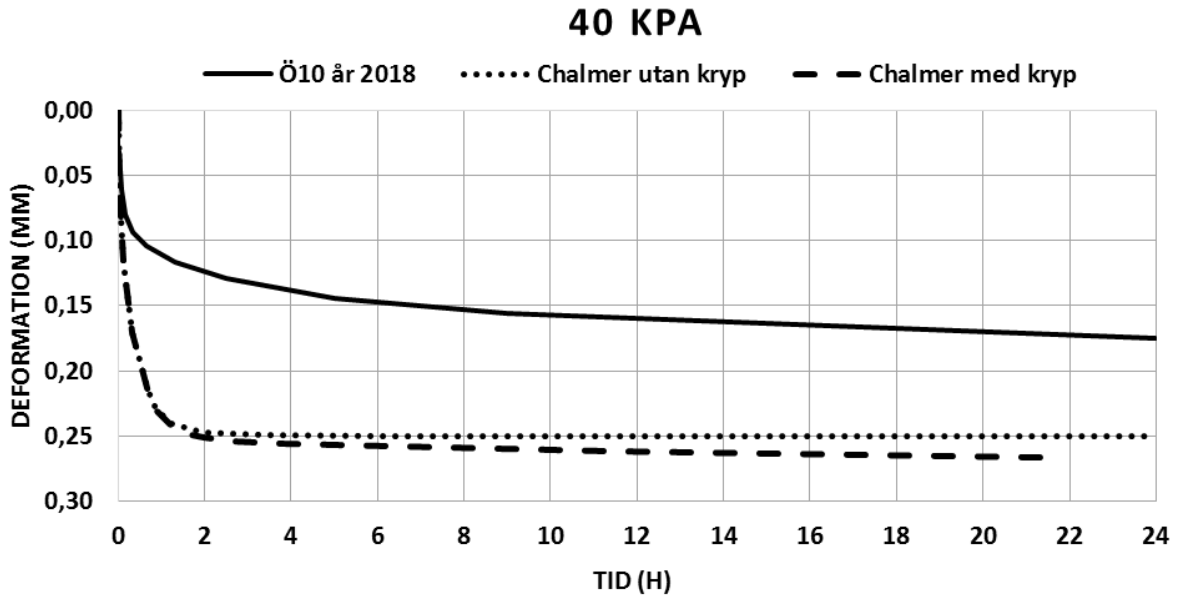
Tabell 8 sammanställer kryptalen  $r_0$  och  $r_1$  för lerprov Ö10 som beräknades med de empiriska sambanden i avsnitt 2.7.3. Parametrarna till ekvationerna finns sammanställda i bilaga C, tabell C1. Ekvation 2.33 beräknades inte på grund av att jordens befintliga jordstryck vad okänt. Kryptalet  $r_0$  (motsvarande låga laster) var med ekvation 2.34 mycket lägre än det utvärderade kryptalet i tabell 6, motsvarande 2 118. Kryptalet  $r_1$  (motsvarande höga laster) var med ekvationerna 2.30 och 2.31 i samma storleksordning som det utvärderade kryptalet i tabell 6, motsvarande 156.

**Tabell 8.** Beräknade kryptal för lerprov Ö10 baserat på empiriska samband

Lerprov	$r_0$	$r_0$	$r_1$	$r_1$
	Ekvation 2.34	Ekvation 2.33	Ekvation 2.30	Ekvation 2.31
Ö10	383	-	83	137–228

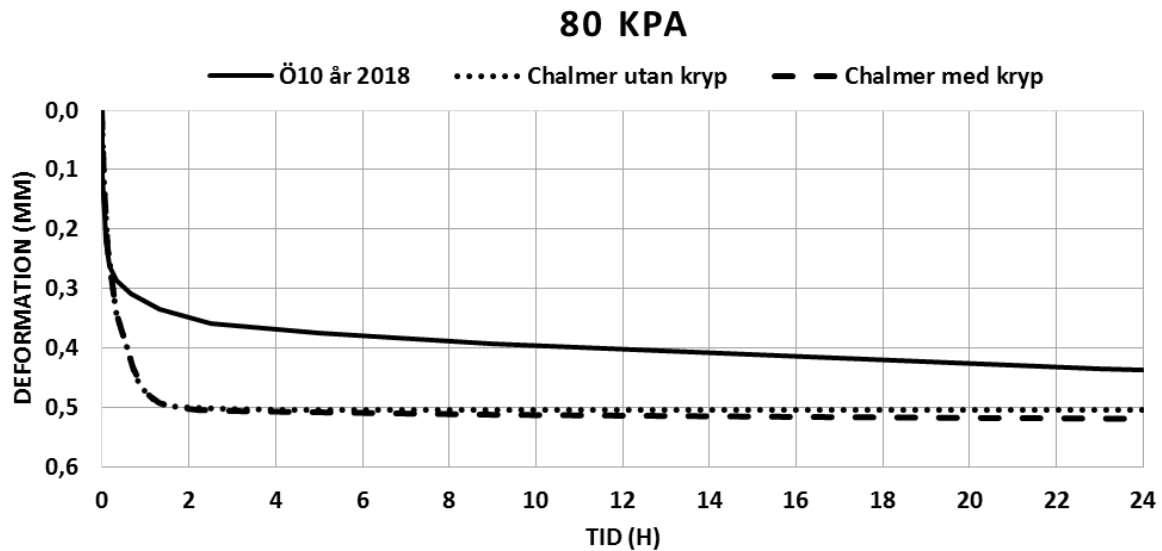
### 4.3 MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT

Modellering av lasten 40 kPa erhöill högre deformation än ödometerförsöket enligt figur 25. Båda modellerna överskattade deformationen och underskattade krypningen. Vid lasten 40 kPa hade 43 % av förkonsolideringstrycket (92 kPa) uppnåtts.



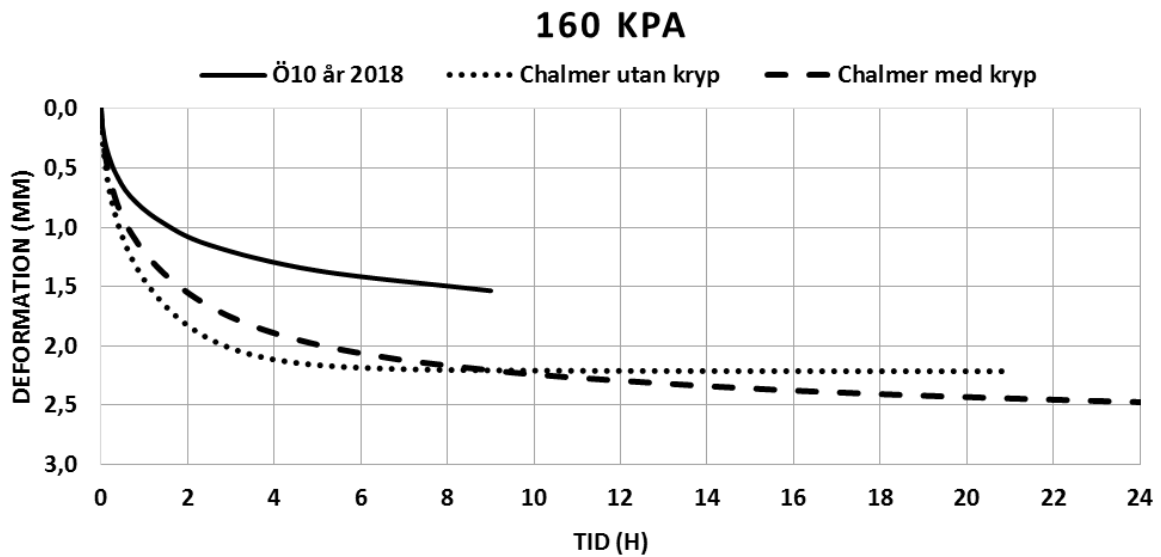
Figur 25. Resultat från Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp för lasten 40 kPa i jämförelse med verkligt utfall från ödometerförsöket med lerprov Ö10 från år 2018 för motsvarande last.

Modellering av lasten 80 kPa erhöill högre deformation än ödometerförsöket enligt figur 26. Båda modellerna överskattade deformationen och underskattade krypningen. Vid lasten 80 kPa hade 87 % av förkonsolideringstrycket uppnåtts.



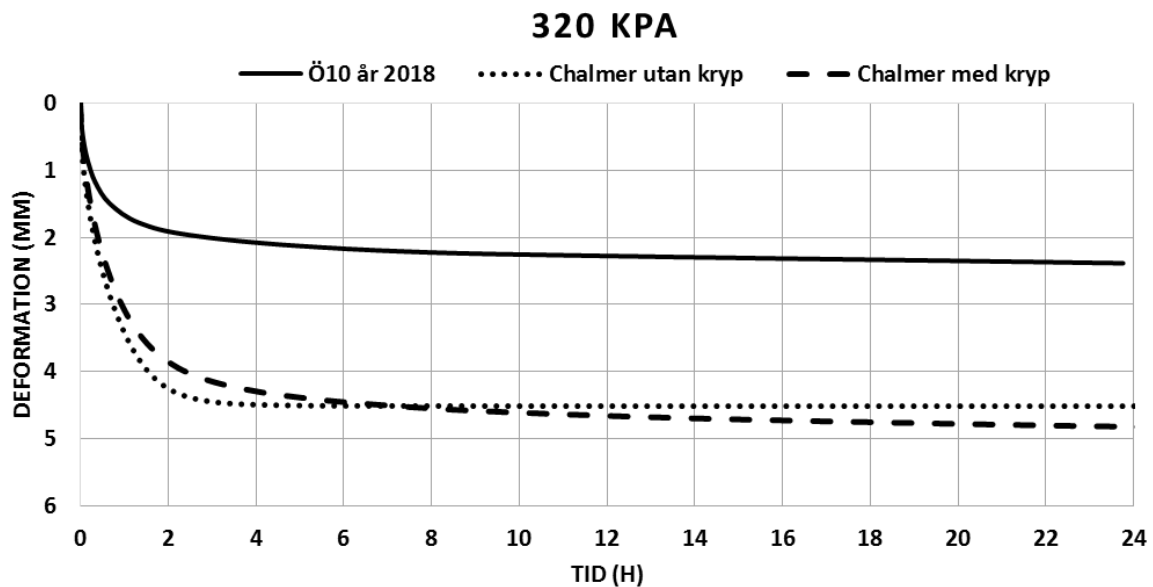
Figur 26. Resultat från Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp för lasten 80 kPa i jämförelse med verkligt utfall från ödometerförsöket med lerprov Ö10 från år 2018 för motsvarande last.

Modellering av lasten 160 kPa erhöill högre deformation än ödometerförsöket enligt figur 27. Båda modellerna överskattade deformationen och Chalmersmodellen utan kryp underskattade krypningen.



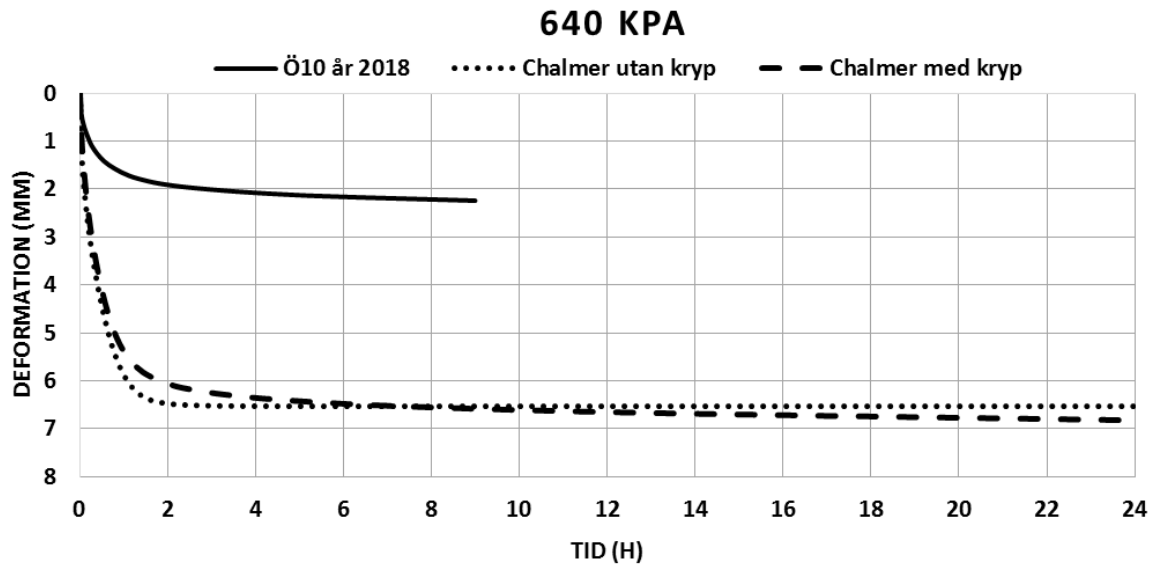
Figur 27. Resultat från Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp för lasten 160 kPa i jämförelse med verkligt utfall från ödometerförsöket med lerprov Ö10 från år 2018 för motsvarande last.

Modellering av lasten 320 kPa erhöill högre deformation än ödometerförsöket enligt figur 28. Båda modellerna överskattade deformationen och Chalmersmodellen utan kryp underskattade krypningen.



Figur 28. Resultat från Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp för lasten 320 kPa i jämförelse med verkligt utfall från ödometerförsöket med lerprov Ö10 från år 2018 för motsvarande last.

Modellering av lasten 640 kPa erhöill högre deformation än ödometerförsöket enligt figur 29. Båda modellerna överskattade deformationen och Chalmersmodellen utan kryp underskattade krypningen.



**Figur 29.** Resultat från Chalmersmodellen med kryp samt Chalmersmodellen utan kryp för lasten 640 kPa i jämförelse med verkligt utfall från ödometerförsöket med lerprov Ö10 från år 2018 för motsvarande last.

## 5. DISKUSSION

I detta kapitel diskuteras arbetets resultat, hur de kan tolkas samt vilka slutsatser som kan dras. Osäkerheter och felkällor belyses och jämförelser med andra arbetens resultat tas upp.

### 5.1 UPPMÄTT KRYPSÄTTNING

I följande avsnitt diskuteras uppmätt krypsättning för Kungsängen och kvarteret Gudrun, samt normaliserad och relativ krypsättning.

#### 5.1.1 Krypsättning – Kungsängen

Höjdavvågningarna för dubbar och fixpunkter innehåller en rad osäkerheter (figur 14 och 15). Arbetet har inte tagit hänsyn till att dubbarna och fixpunkterna sitter på olika stora byggnader som därmed bidrar till olika jordtryck. Arbetet tar inte heller hänsyn till kompenserade byggnader (med källare eller krypgrund). Detta bidrar till att vissa punkter i figurerna kan påvisa större sättning med tiden än andra, varav en större dataspridning erhålls. Hämtad data för fixpunkter och dubbar är utspridda över ett stort område och dess underliggande lermäktigheter bör betraktas som osäkra. En viktig aspekt försvinner genom att undersöka mätningens tidslängd (i antal år) istället för ett kronologiskt perspektiv; att kryphastigheten minskar med tiden efter att last påförs marken. Trots osäkerheter och felkällor indikerar resultaten att någon form av långtidssättning sker, eftersom byggnaderna byggdes för 80–170 år sedan. I detta arbete antas denna långtidssättning vara krypsättning.

I figur 14 och 15 framgår att större lermäktigheter ger större lutning på de linjära sambanden och således större krypsättning. Resultaten går i linje med framlagd teori och även om de linjära regressionerna inte var signifikanta innebär det inte att dessa är falska. Sambanden styrks nämligen av utförda korrelationstester eftersom signifikant korrelation erhöles för både dubb- och fixpunktsdata mellan mätningarnas tidslängd, lermäktighet, krypsättning och normaliserad krypsättning. Med mer beräkningspunkter eller genom att minimera faktorer som ger dataspridning, finns det en möjlighet att erhålla normalfördelad data och därmed signifikanta regressioner.

Det linjära sambandet från dubbdata i figur 14 (tillika tabell B1 i bilaga B) pekar mot att byggnader på Kungsängen med omnejd utsätts för en krypsättningar i storleksordningen 0–2 cm efter 1 år, 3–5 cm efter 10 år, 13–22 cm efter 50 år, 25–43 cm efter 100 år, 38–65 cm efter 150 år samt 50–86 cm efter 200 år. Krypsättningen ökar med ökad lermäktighet. Notera att för en lermäktighet av 40–60 m erhålls en krypsättning av cirka 22 cm efter 50 år (bilaga B tabell B1) vilket är i liknande storleksordning som den krypsättning som sker i kvarteret Gudrun med en lermäktighet av cirka 45 m. Figur 15 visande fixpunktsdata (tillika tabell B1 i bilaga B) erhåller mindre rimliga linjära samband eftersom marksänkning erhålls först efter att 10 år passerat. Dock visar även fixpunktsdata att krypsättningar generellt ökar med ökande lermäktighet (figur 15).

### 5.1.2 Krypsättning – kvarteret Gudrun

Kvarteret Gudrun vars sättningshistorik undersöktes för dubb 8, dubb 37 samt fixpunkt 90471 visade på en tydlig krypsättning med tiden (figur 17). Fixpunkten hade en signifikant trend med tiden enligt Mann–Kendalls test och det fanns således möjlighet att förutspå sättningar för denna fixpunkt i ett längre tidsperspektiv. Samma slutsats gäller inte för dubb 8 och dubb 37 eftersom dessa inte hade signifikanta trender på grund av för få mätpunkter. Om höjdavvägningar för dubbarna och fixpunkten fortgår i framtiden finns det goda förutsättningar för att dra slutsatser gällande krypning i kvarteret Gudrun. En aspekt som är särskilt intressant är att undersöka om kryphastigheten minskar med tiden. Fixpunkt 90471 har krupit cirka 20 cm över 47 år (tabell 4) vilket är i samma storleksordning som det linjära sambandet för 40–60 m lermäktighet i figur 14 uppvisat; cirka 22 cm över 50 år. Kvarteret Gudrun har en lermäktighet på cirka 45 m vilket gör dessa jämförbara.

### 5.1.3 Normaliserad sättning

Figur 16 styrker att det finns ett samband mellan krypsättning, tid och lermäktighet eftersom det fanns en signifikant korrelation mellan normaliserad sättning och tid. Detta styrker återigen att krypsättning kan betraktas som en respons av tid och lermäktighet i området Kungsängen med omnejd.

### 5.1.4 Relativ sättning

Tabell B2 och B3 i bilaga B sammanställer beräknad relativ krypsättning för dubbavvägningar och fixpunktsavvägningar. Relativ krypsättning för dubbdata varierar mellan  $-0,004$ – $0,416$  promille av lermäktigheten per år, med ett medelvärde av  $0,136$  promille/år. Relativ krypsättning för fixpunktsdata varierar mellan  $-0,006$ – $0,347$  promille av lermäktigheten per år, med ett medelvärde av  $0,067$  promille/år. Spridningen antyder återigen att undersökt data innehåller felkällor och att data skulle behöva avsmalnas för att ge mer representativa värden. Det som dock är tydligt är att fixpunkter i Kungsängen med omnejd upplever en mindre krypsättning än dubbar.

## 5.2 BERÄKNAD KRYPSÄTTNING

I följande avsnitt diskuteras tidsmotståndsteorin samt hur krypparametrar bäst bör erhållas; från ödometerförsök eller empiriska samband. Det som fastställs gällande krypning i Eurokod 7 diskuteras också.

### 5.2.1 Tidsmotståndsteorin

Av tabell 5 och 6 framgår att utvärderade krypparametrar varierar mellan olika lertyper och laster vid ödometerförsök. Generellt följer trenden att ju lägre laster desto mindre krypning. Kryptalet  $r$  varierar mellan 96–58 373 beroende på last och lerprov, där alla värden över 10 000 innebär att krypningen enligt Olsson (2010) kan betraktas som försumbar. Detta förekommer för lerproverna från Kungsängen 33:2 vid spänningen 26 kPa med kryptal  $r$  motsvarande cirka 58 000, 28 000 respektive 33 000. Kryptalet  $r$



minskar under 10 000 runt spänningen 45 kPa (se figur 18). Baserat på denna information kan krypningen för grå postglacial lera (Ö4) samt varvig lera med inslag av siltskikt (Ö8 och Ö14) antas vara försumbar vid en last under 45 kPa. Tyvärr kunde inte kryptal utvärderas för de lägsta lasterna för Kungsängen 24:2, men det finns anledning att tro att även dessa hade uppvisat kryptal  $r$  över 10 000 om mätningen lyckats. Att det är svårt att erhålla kryptal för låga laster är ett dilemma som förekommit i andra arbeten, däribland Olsson (2010).

Kryptalet  $r$  för lerprov Ö34 (figur 18) gav upphov till ett beteende som inte överensstämde med teori vid låga laster. Resterande lerprov uppvisade dock ett teoretiskt beteende. Det finns således anledning att tolka krypsättning beräknade utifrån Ö34 mer kritiskt än för de övriga lerproven, vid *låga* laster.

Det högsta laststeget 640–1 280 kPa för Kungsängen 24:2 kunde inte utvärderas då sensorn på ödometern registrerade deformationen först efter ett tag. Detta innebär att kryptalet saknas för de högsta lasterna och att kryptalet  $r_0$  (se figur 8 avsnitt 2.5) därmed inte med säkerhet kan utvärderas för Kungsängslera.

Av tabell 5 och 6 framgår att krypningen påbörjas efter 2 500–32 400 s ( $t_0$ ). Att krypning sker redan efter 2 500 s kan vara orimligt. Att utvärdera kryptal från  $R:t$ -kurvorna var inte självklart eftersom det var godtyckligt att avgöra när  $R:t$ -kurvan blev linjär, det vill säga när krypningen inträdde vid tiden  $t_0$ . För vissa fall uppvisades ett linjärt beteende de tre sista punkterna och för andra fall de två sista punkterna (baserat på data i bilaga A, tabell A1–A5). Att dra slutsatsen att det finns ett linjärt samband mellan endast två punkter är aldrig fördelaktigt men det är vad som har skett för vissa fall i detta arbete.

Av figur 19 framgår att lerprov Ö10 (svart lerig gyttja) generellt ger upphov till störst kryptöjning med tiden. Lerprov Ö4 (grå postglacial lera) ger också upphov till några högre värden av kryptöjning. Minst kryptöjning ger lerprov Ö34 (brungrå siltig lera). Att olika kryptöjningar erhålls för olika typer av leror är en god indikation på att tidsmotståndsteorin fångar att lerors deformationsegenskaper skiljer sig åt. Att lerprov Ö10 (svart lerig gyttja) ger störst kryptöjning är rimligt eftersom gyttja generellt deformeras mer än andra leror. I verkligheten är den svarta leriga gyttjan troligtvis endast en liten andel av den totala lermäktigheten.

För att beräkna vilken krypsättning som kryptöjningen (figur 19) gav upphov till multiplicerades kryptöjningen med en vattenmättad lermäktighet som motsvarade de olika laststegen för respektive lerprov. Leran antogs vara vattenmättad men det hade förstås varit fullt möjligt att räkna på torr lera samt med en annan tunghet än 17 kN/m<sup>3</sup>. Trots att lerorna skiljde sig åt mellan lerproven antogs alla ha samma tunghet, vilket förstås inte är fallet i verkligheten.

I figur D1–D5 i bilaga D framgår att krypsättning startar från ett högt initialt värde för vissa laster. Detta höga initiala värde är efter att ett år passerat, tiden startar därmed inte på noll. Det går således att konstatera att den största krypsättningen erhålls redan under det första året enligt tidsmotståndsteorin. Samma figurer visar också att krypsättningen

ökar med tiden, men inte nödvändigtvis med ökande lerlager. Detta beror på de utvärderade krypparametrarnas påverkan på ekvation 2.13. Av figurerna ses att teorin fångar att kryphastigheten minskar med tiden.

Den krypsättning som sker mellan 100 och 150 år (en sekvens av 50 år) i tabell D2 i bilaga D är för samtliga lerprov väldigt liten i förhållande till uppmätta krypsättningar. Om samma jämförelse genomförs för åren 1 och 50 år (en sekvens av 50 år) är krypsättningen istället väldigt stor i förhållande till uppmätta krypsättningar. Det finns således anledning att misstänka att tidsmotståndsteorin överskattar krypningen initialt och underskattar denna ur ett längre tidsperspektiv.

Sammanfattningsvis är tidsmotståndsteorin tillämpbar vid beräkning av krypsättning för Kungsängslera eftersom den i praktiken följer teorin bakom krypning. Teorin är dock arbetsomfattande, tidskrävande samt noterbart känslig vid utvärdering av krypparametrar. Storleksordningen på krypsättningen beror av vilken lera som undersökts samt vilken last den utsatts för och det är svårt att dra slutsatser gällande Kungsängslerans krypsättning baserat på teorin.

### 5.2.2 Empiriska samband

Kryptalet  $r_0$  som beräknades för lerprov Ö10 med ekvation 2.34 till 383 (tabell 8) är mycket mindre än kryptalet som erhöles med ödometerförsöket, som överstiger 10 000 (tabell 6). Detta kan bero på att spänningssituationen var under förkonsolideringstrycket och att fel ekvation tillämpades. Ekvation 2.30 och 2.31 som beräknade kryptal  $r_1$  gav upphov till kryptal i samma storleksordning som det från ödometerförsöket (tabell 6). Detta innebär att dessa ekvationer eventuellt kan användas istället för ett ödometerförsök för att erhålla kryptalet  $r_1$  till tidsmotståndsteorin. Dock bör detta studeras noggrannare innan några konkreta slutsatser kan dras. Dessutom måste det finnas en möjlighet att beräkna kryptalet  $r_0$  empiriskt för att ersätta ett ödometerförsök.

### 5.2.3 Eurokod 7

Vid genomläsning av Eurokod 7 eftersöktes all information som berörde krypning. Att krypning har många namn var sedan innan känt men därutöver förekom begrepp som krävde en godtycklig tolkning huruvida Eurokod syftade till krypning eller ej. Exempelvis fastställs principen i kapitel två (grunder för geoteknisk dimensionering) att samtliga dimensioneringsfall skall beakta att tidseffekter kan vara av viktig betydelse för finkornig jords deformation. Detta har i arbetet således tolkats som att det antyder på konsolidering eller krypning, alternativt båda. Andra begrepp som förekommit och som tolkats antyda på krypning är sättning, långtidssättning samt långsiktiga beteenden. Därutöver finns det tydligare definitioner såsom krypning och långtidskrypning. Denna variation av olika benämningar i Eurokod 7 innebär att utövaren genomför en godtycklig bedömning.

Gällande metoder för att beräkna krypning hänvisar Eurokod 7 del 1 till allmänt erkända metoder vid plattgrundläggning. Med avseende på krypning är det dock inte självklart gällande vad som är en allmänt erkänd metod eller inte. Chalmersmodellen med kryp och tidsmotståndsteorin är kanske allmänt erkända metoder och i sådana fall har detta arbete

utvärderat dessa och således indirekt Eurokod 7. Att Eurokod 7 hänvisar till allmänt erkända metoder samtidigt som standarden hävdar att krypning måste tas hänsyn till finns det utrymme att kritisera av flera anledningar. Dels är krypning något som forskare ännu inte är helt överens om när det inträder under sättningsförloppet eller hur det bör beräknas. Dessutom är det olämpligt för en utövare att göra en godtycklig bedömning.

### **5.3 MODELLERING MED GEOSUITE SETTLEMENT**

Vid modellering av ödometerförsök för lerprov Ö10 framgick att samtliga laster (40, 80, 160, 320 och 640 kPa) erhöll en större deformation med Chalmersmodellen med kryp och Chalmersmodellen utan kryp än vad ödometerförsöket gav upphov till (figur 25–29). Överskattningen ökar med ökad last. Vid den högsta lasten 640 kPa erhölls en överskattad deformation på cirka 4–5 mm av den totala lermäktigheten på 20 mm. Att Chalmersmodellen med kryp och Chalmersmodellen utan kryp uppvisar liknande storleksordning vid modellering kan antyda på att det inte är kryptillägget i modellen (ekvation 2.20) som är problematiken till överskattad deformation. Det kan vara någon annan parameter enligt den teori (avsnitt 2.6.2) som modellen bygger på som är det egentliga problemet bakom överskattningen, eller en kombination av flera parametrar.

Chalmersmodellen utan kryp når en konstant deformation efter en viss tid medan Chalmersmodellen med kryp uppvisar en svag lutning och därmed ökande deformation med tiden, det vill säga krypning. Även om storleksordningen på deformationen är olika mellan modelleringsresultaten och ödometerresultaten, indikerar detta att Chalmersmodellen med kryp följer en mer sanningsenlig deformationskurva än Chalmersmodellen utan kryp.

I detta arbete modelleras ett ödometerförsök och inte ett verkligt fall av krypsättning på grund av brist på data. Bara för att Chalmersmodellen med kryp överskattar deformationen i ett ödometerförsök finns det inget i detta arbete som bevisar att det även gäller vid modellering av långtidssättningar för större lermäktigheter. Det finns arbeten som påvisat att Geosuite Settlement är lämpligt för att modellera sättningar över tiden, däribland Olsson (2010). En mer detaljerad studie bör därför genomföras innan Chalmersmodellen med kryp kan förkastas eller verifieras som lämplig för Kungsängslera. Det som dock går att konstatera är att modellen kräver parametrar från både CRS- och ödometerförsök, vilket är både tidskrävande och arbetsomfattande.

## 6. SLUTSATSER

*Slutsatser med avseende på frågeställning 1 som berör verkliga krypsättningar i Kungsängen:*

- Byggnader byggda för 80–170 år sedan är påverkade av krypning än idag och två drivande faktorer är tid och lermäktighet. För dessa byggnader ger en lermäktighet av cirka 45 m upphov till en krypsättning på cirka 20 cm för en 50 årsperiod och den relativa krypsättningen är cirka 0,134 promille av lermäktigheten per år för dubbar respektive 0,067 för fixpunkter.

*Slutsatser med avseende på frågeställning 2 som berör Eurokod 7:*

- I Eurokod 7 framgår att krypning bör beaktas vid dimensionering av plattgrundläggning, pålgrundläggning, totalstabilitet, stödkonstruktioner och bankar, men det finns inget förslag på beräkningsmetoder. För dimensionering av plattgrundläggning hänvisas utövaren till allmänt erkända metoder.

*Slutsatser med avseende på frågeställning 3 som berör tidsmotståndsteorin:*

- Tidsmotståndsteorin förutspår krypning i samma storleksordning som verklig krypning men tenderar att överskatta krypningen kort tid efter att last tillförts marken samt underskatta krypningen efter lång tid last tillförts marken. Enligt vissa lerprover är Kungsängslerans krypning försumbar för laster under cirka 45 kPa eftersom kryptalet  $r$  passerar 10 000. Krypningen ökar generellt med ökande tid, lermäktighet och last varav tidsmotståndsteorin kan vara lämplig för beräkning av Kungsängslerans krypsättning.

*Slutsatser med avseende på frågeställning 4 som berör Chalmersmodellen med kryp:*

- Chalmersmodellen med kryp överskattar deformationen och underskattar kryphastigheten vid modellering av ödometerförsök. En mer utförlig undersökning bör dock genomföras innan modellen kan verifieras eller förkastas som lämplig beräkningsmetod av Kungsängslerans krypsättning.

## 7. FRAMTIDA STUDIER

Ytterligare försök med tidsmotståndsteorin för Uppsalalera eller Kungsängslera rekommenderas att genomföras och jämföras mot verkligt uppmätt krypsättning som noterats från dess att last påförts marken (tiden noll) och så långt fram i tiden som möjligt. Genom detta kan tidsmotståndsteorin förkastas eller verifieras som en lämplig metod vid beräkning av Kungsängslerans krypsättning. Som rekommendation bör ödometerförsöken genomföras längre än 24 timmar per laststeg och flera lerprov från samma djup bör undersökas för att kunna förkasta orimliga kryppparametrar.

Att genomföra kontinuerliga höjdavvägningar för en byggnad från dess att den anlagts och minst 50 år fram i tiden kan ge en god bild över vilken krypning som sker i Kungsängen. Att följa upp gamla mätningar kontinuerligt är också ett alternativ. För Kungsängen är kvarteret Gudrun en god kandidat för uppföljning av höjdavvägningar eftersom den har långa tidsserier tillhandahållna från Bjerking redan nu.

Att ersätta ödometerförsök genom att erhålla kryppparametrar från empiriska samband är av stort intresse eftersom detta skulle minska tidsmotståndsteorins arbets- och tidsomfattning. Det finns således ett behov av att undersöka empiriska samband närmre samt undersöka om dessa kryppparametrar överensstämmer med ödometerförsök och verklig krypsättning.

Detta arbete har påvisat att fixpunkter i Kungsängen med omnejd sätter sig med tiden. Det finns således ett behov att undersöka detta närmre samt verifiera orsakerna bakom detta eftersom fixpunkter egentligen inte bör uppvisa rörelse med tiden.

## REFERENSER

- Axelsson, K. & Mattsson, H., 2016. *Geoteknik*. 1:1 red. Lund: Studentlitteratur AB.
- Bjerking, 1988. *Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala*. Uppsala: OffsetCenter AB.
- Bjerking, 2018. *Kartportal Kungsängen*. Uppsala: Bjerking.
- Boverket, 2013. *Tillgängliga eurokoder och andra standarder inom byggsektorn*, Karlskrona: Boverket.
- Boverket, u.d. *Boverkets konstruktionsregler (1993:58) - föreskrifter och allmänna råd*. [Online]  
Available at: <https://www.boverket.se/sv/lag--ratt/forfattningssamling/upphavda/bkr---bfs-199358/>  
[Använd 31 Januari 2018].
- Claesson, P., 2003. *Long Term Settlements in Soft Clays*, Göteborg: Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.
- Das, B. M., 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*. 7:e red. Stamford: Cengage Learning.
- European Commission, u.d. *About the EN Eurocodes*. [Online]  
Available at: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=1>  
[Använd 31 Januari 2018].
- European Commission, u.d. *EN 1997: Geotechnical Design*. [Online]  
Available at: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=137>  
[Använd 31 Januari 2018].
- Google Maps, 2018. *Google Maps Kungsängen Uppsala*. [Online]  
Available at:  
<https://www.google.se/maps/place/Kungs%C3%A4ngen,+Uppsala/@59.8470284,17.6387086,14.34z/data=!4m5!3m4!1s0x465fc957434f7ec9:0xcb8a09aa27cc8f52!8m2!3d59.8475539!4d17.655699?dcr=0>  
[Använd 12 2 2018].
- Hansbo, S., 1975. *Jordmateriallära*. Stockholm: Almqvist & Wiksell Förlag AB.
- Havel, F., 2004. *Creep in soft soils*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- IEGa, 2008. *Tillämpningsdokument EN 1997-1 kapitel 6 Plattgrundläggning*, Stockholm: IEG.

IEGb, 2008. *Tillämpningsdokument EN 1997-1 Kapitel 11 och 12, Slänter och bankar*, Stockholm: IEG.

ISO, 2004. *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5: Incremental loading oedometer test*, Geneva: ISO/TS 17892-5.

ISO, u.d. *International Organization for Standardization*. [Online]  
Available at: <https://www.iso.org/standard/38518.html>  
[Använd 5 2 2018].

Janbu, N., 1969. *The resistance concept applied to deformations of soils*. Mexico, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 193-196.

Johansson, T. & Bayoglu Flener, E., 2018. *Dataobservationer Bjerking* [Intervju] (17 Januari 2018).

Lambe, W. T. & Whitman, R. V., 1979. *Soil Mechanics*. New York: JOHN WILEY & SONS.

Larsson, R., 1977. *Basic Behaviour of Scandinavian Soft Clays*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Rapport 4).

Larsson, R., 2007. *Långtidsobservationer av konsolideringsprocesser*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Rapport 70).

Larsson, R., 2008. *Jords egenskaper*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Information 1).

Larsson, R., Bengtsson, P.-E. & Eriksson, L., 1994. *Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig jord - Beräkning av sättningars storlek och tidsförlopp*, Linköping: Statens geotekniska institut.

Larsson, R., Bengtsson, P.-E. & Eriksson, L., 1997. *Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Information 13E).

Larsson, R. o.a., 2007. *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Information 3).

Larsson, R. o.a., 2007. *Sulfidjord - geotekniskt klassificering och odränerad skjuvhållfasthet*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Rapport 69).

Lundberg, K., 1992. *Uppsalas byggnader*. Uppsala: Kulturförvaltningen, Uppsala kommun i samarbete med Upplandsmuseet.

Lundh, H., 1996. *Grundläggande hållfasthetslära*. 1:a red. Stockholm: Nordstedts.

Miljöstatistik, u.d. *Mann-Kendall test*. [Online]

Available at: <http://www.miljostatistik.se/mannkendall.html>

[Använd 9 4 2018].

Mitchell, J. K., 1993. *Fundamentals of Soil Behaviour*. 2:a red. New York: John Wiley & Sons Inc.

Novapoint, 2016. *Novapoint & Quadri Resource Center*. [Online]

Available at:

[http://resourcecenter.novapoint.com/doku.php?id=se:np:geotechnics:aboutgeotechnicsin\\_novapoint:start](http://resourcecenter.novapoint.com/doku.php?id=se:np:geotechnics:aboutgeotechnicsin_novapoint:start)

[Använd 12 April 2018].

Olsson, M., 2010. *Calculating long-term settlement in soft clays - with special focus on the Gothenburg region*, Linköping: Swedish Geotechnical Institute (Rapport 74).

R-Project, u.d. *The R Project for Statistical Computing*. [Online]

Available at: <https://www.r-project.org/>

[Använd 11 4 2018].

SIS, 1991. *Geotekniska provtagningsmetoder - Kompressionsegenskaper - Ödometerförsök, CRS-försök - Kohesionsjord*, Stockholm: Svensk standard SS 027129.

SISa, 2010. *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler*, Stockholm: SIS Förlag AB.

SISb, 2010. *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 2: Marktekniska undersökningar*, Stockholm: SIS Förlag AB.

Svanö, G., Christensen, S. & Nordahl, S., u.d. A.

Svenska Geotekniska Föreningen, 2016. *IEG tillämpningsdokument*. [Online]

Available at: <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=2675>

[Använd 31 Januari 2018].

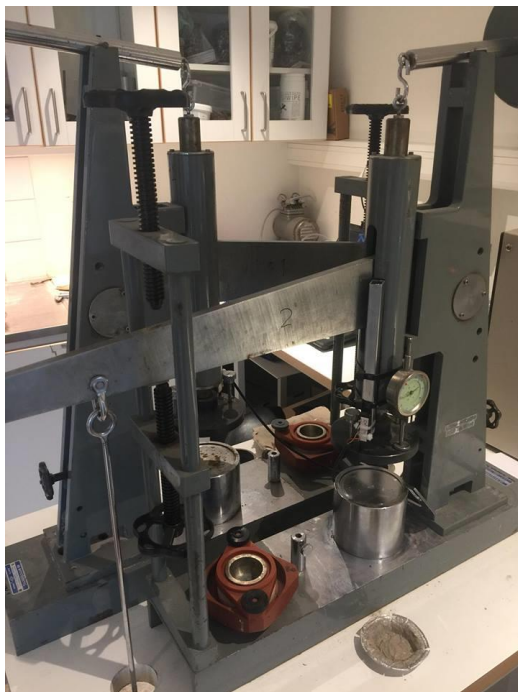
Sveriges Standardiseringsförbund, u.d. *Om Standardiseringsförbundet*. [Online]

Available at: <http://standardiseringsforbundet.se/om/>

[Använd 31 Januari 2018].



## BILAGA A – Data från försök med ödometer



**Figur A1.** Två standardödometrar tillhörande Bjerking's laboratorium. Foto: Maria Nylander.

**Tabell A1.** Deformation över tiden för lerprov Ö4 från ödometerförsök från år 1978 för sex olika laststeg

Ö4											
0–11,5 kPa		11,5–26 kPa		26–55 kPa		55–113 kPa		113–230 kPa		230–460 kPa	
Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)
0	0	0	0,08	0	0,18	0	0,44	0	2,22	0	4,65
4	0,02	4	0,1	4	0,23	4	0,49	4	2,29	4	4,75
9	0,025	9	0,105	9	0,24	9	0,515	9	2,32	9	4,79
16	0,03	16	0,11	16	0,25	16	0,53	16	2,35	16	4,83
25	0,03	25	0,115	25	0,26	25	0,55	25	2,39	25	4,87
49	0,04	49	0,12	49	0,27	49	0,58	49	2,46	49	4,94
100	0,045	100	0,13	100	0,29	100	0,64	100	2,58	400	5,41
225	0,05	225	0,135	225	0,32	225	0,72	225	2,83	625	5,54
400	0,06	400	0,14	400	0,33	400	0,8	400	3,05	900	5,64
625	0,07	625	0,145	625	0,34	625	0,875	625	3,28	1600	5,76
900	0,075	900	0,15	900	0,35	900	0,95	900	3,49	2500	5,85
1600	0,075	1600	0,155	1600	0,36	1600	1,07	1600	3,83	3600	5,89
2500	0,075	2500	0,16	2500	0,37	2500	1,18	2500	4,04	10380	6,01
3600	0,08	3600	0,161	3600	0,375	3600	1,27	3600	4,16	28320	6,08
68760	0,08	85500	0,18	19920	0,41	14760	1,71	11940	4,42	89220	6,17
				83760	0,44	85020	2,22	27540	4,53		
								87360	4,65		

**Tabell A2.** Deformation över tiden för lerprov Ö8 från ödometerförsök från år 1978 för sex olika laststeg

Ö8											
0–11,5 kPa		11,5–26 kPa		26–55 kPa		55–113 kPa		113–230 kPa		230–460 kPa	
Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)
0	0	0	0,105	0	0,32	0	0,64	0	1,41	0	3,37
4	0,025	4	0,15	4	0,4	4	0,7	4	1,5	4	3,46
9	0,03	9	0,16	9	0,41	9	0,72	9	1,53	9	3,49
16	0,03	16	0,165	16	0,415	16	0,735	16	1,55	16	3,52
25	0,03	25	0,17	25	0,42	25	0,75	25	1,58	25	3,55
49	0,035	49	0,185	49	0,43	49	0,77	49	1,63	49	3,61
100	0,04	100	0,185	100	0,455	100	0,81	100	1,73	100	3,72
225	0,05	225	0,205	225	0,48	225	0,87	225	1,91	225	3,85
400	0,055	400	0,22	400	0,505	400	0,92	625	2,23	400	3,98
625	0,065	625	0,235	625	0,52	625	0,96	900	2,39	625	4,05
900	0,07	900	0,24	900	0,53	900	1	1600	2,67	900	4,16
1600	0,08	1600	0,25	1600	0,545	1600	1,05	2500	2,86	1600	4,26
2500	0,09	2500	0,26	2500	0,55	2500	1,09	3600	2,98	2500	4,32
3600	0,1	3600	0,27	3600	0,56	3600	1,12	12120	3,22	3600	4,36
68580	0,15	85500	0,32	20100	0,6	14880	1,26	27720	3,3	10800	4,44
				83820	0,64	84960	1,41	87120	3,37	28740	4,49
										89640	4,55

**Tabell A3.** Deformation över tiden för lerprov Ö14 från ödometerförsök från år 1978 för sex olika laststeg

Ö14											
0–11,5 kPa		11,5–26 kPa		26–55 kPa		55–113 kPa		113–230 kPa		230–460 kPa	
Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)
0	0	0	0,12	0	0,28	0	0,55	0	1,01	0	2,64
4	0,02	4	0,13	4	0,295	9	0,58	4	1,07	4	2,71
9	0,02	9	0,135	9	0,3	16	0,59	9	1,09	9	2,73
16	0,02	16	0,14	16	0,305	25	0,6	25	1,11	16	2,75
25	0,025	25	0,14	25	0,31	49	0,62	49	1,14	25	2,77
49	0,03	49	0,145	49	0,32	100	0,64	100	1,2	49	2,83
100	0,04	100	0,15	100	0,34	225	0,69	225	1,3	100	2,9
225	0,05	225	0,17	225	0,37	400	0,73	400	1,38	225	3,05
400	0,065	400	0,185	400	0,395	625	0,77	625	1,48	400	3,17
625	0,07	625	0,2	625	0,42	900	0,8	900	1,58	625	3,3
900	0,08	900	0,21	900	0,44	1600	0,84	1600	1,75	900	3,42
1600	0,09	1600	0,23	1600	0,465	2500	0,86	2500	1,91	1600	3,6
2500	0,1	2500	0,235	2500	0,48	3600	0,88	3600	2,02	2500	3,73
3600	0,115	3600	0,24	3600	0,49	14520	0,95	11760	2,36	3600	3,81
68820	0,12	84960	0,28	20340	0,53	84960	1,01	27360	2,52	10080	3,93
				84420	0,55			87480	2,64	17580	4
										85680	4,08

**Tabell A4.** Deformation över tiden för lerprov Ö10 från ödometerförsök utfört i Bjerking's laboratorium år 2018 för sju olika laststeg

Ö10													
0–20 kPa		20–40 kPa		40–80 kPa		80–160 kPa		160–320 kPa		320–640 kPa		640–1 280 kPa	
Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)
0	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,10	4	0,02	4	0,07	4	0,03	4	0,09	4	0,09	4	0,09
10	0,12	10	0,02	10	0,08	10	0,04	10	0,14	10	0,14	10	0,12
20	0,13	20	0,03	20	0,09	20	0,05	20	0,17	20	0,17	20	ej reg
40	0,14	40	0,03	40	0,11	40	0,08	40	0,22	40	0,22	40	ej reg
80	0,15	80	0,04	80	0,15	80	0,13	80	0,32	80	0,32	80	ej reg
160	0,15	160	0,05	160	0,18	160	0,19	160	0,46	160	0,46	160	ej reg
300	0,16	300	0,06	300	0,22	300	0,27	300	0,63	300	0,63	300	ej reg
600	0,18	600	0,08	600	0,26	600	0,39	600	0,87	600	0,87	600	1,69
1200	0,19	1200	0,09	1200	0,29	1200	0,54	1200	1,18	1200	1,18	1200	1,53
2400	0,20	2400	0,10	2400	0,31	2400	0,74	2400	1,50	2400	1,50	2400	1,37
4800	0,21	4800	0,12	4800	0,34	4800	0,94	4800	1,78	4800	1,78	4800	1,25
9000	0,21	9000	0,13	9000	0,36	9000	1,15	9000	1,97	9000	1,97	9000	1,16
18000	0,22	18000	0,14	18000	0,37	18000	1,36	18000	2,13	18000	2,13	18000	1,08
32400	0,23	32400	0,16	32400	0,39	32400	1,53	32400	2,24	32400	2,24	32400	1,01
		86397	0,18	82800	0,44			85529	2,39			86296	12,63
				86400	0,44								

**Tabell A5.** Deformation över tiden för lerprov Ö34 från ödometerförsök utfört i Bjerking's laboratorium år 2018 för sju olika laststeg

Ö34													
0–20 kPa		20–40 kPa		40–80 kPa		80–160 kPa		160–320 kPa		320–640 kPa		640–1 280 kPa	
Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)	Tid (s)	Def (mm)
0	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,03	4	0,10	4	0,02	4	0,08	4	0,00	4	0,11	4	0,10
10	0,03	10	0,10	10	0,03	10	0,09	10	0,07	10	0,13	10	0,15
20	0,03	20	0,12	20	0,03	20	0,11	20	0,10	20	0,17	20	0,17
40	0,04	40	0,08	40	0,05	40	0,13	40	0,12	40	0,21	40	0,21
80	0,04	80	0,11	80	0,06	80	0,16	80	0,16	80	0,29	80	0,28
160	0,05	160	0,09	160	0,07	160	0,20	160	0,22	160	0,34	160	0,36
300	0,06	300	0,10	300	0,10	300	0,23	300	0,30	300	0,46	300	0,47
600	0,07	600	0,11	600	0,11	600	0,27	600	0,38	600	0,61	600	0,58
1200	0,09	1200	0,11	1200	0,12	1200	0,30	1200	0,48	1200	0,74	1200	0,65
2400	0,10	2400	0,12	2400	0,13	2400	0,33	2400	0,57	2400	0,84	2400	0,71
4800	0,10	4800	0,12	4800	0,13	4800	0,34	4800	0,62	4800	0,91	4800	0,74
9000	0,09	9000	0,13	9000	0,14	9000	0,36	9000	0,66	9000	0,94	9000	0,77
18000	0,09	18000	0,14	18000	0,16	18000	0,39	18000	0,71	18000	0,97	18000	0,80
32400	0,09	32400	0,15	32400	0,16	32400	0,41	32400	0,74	32400	0,99	32400	0,83
86397	1,83	86397	0,17	82800	0,18	86399	0,403	85529	0,78	86400	1,02	86384	0,85
86397	1,83			86400	0,18							86400	0,88

## BILAGA B – Uppmätt krypning

**Tabell B1.** Beräknad krypsättning för olika lermäktigheter baserat på linjära samband från figur 14 och 15 för dubbdataba och fixpunktsdata.

DUBB			Krypsättning (cm)					
Lermäktighet	<i>k</i>	<i>m</i>	1 år	10 år	50 år	100 år	150 år	200 år
10–20 m	-0,27	0,06	-0,2	-2,6	-13,4	-26,8	-40,2	-53,6
20–30 m	-0,25	-0,46	-0,7	-2,9	-12,8	-25,2	-37,5	-49,9
40–60 m	-0,42	-1,22	-1,6	-5,4	-22,3	-43,4	-64,5	-85,6
FIX			Krypsättning (cm)					
Lermäktighet	<i>k</i>	<i>m</i>	1 år	10 år	50 år	100 år	150 år	200 år
5–10 m	-0,05	0,16	0,1	-0,3	-2,1	-4,4	-6,7	-8,9
20–30 m	-0,39	13,58	13,2	9,6	-6,1	-25,8	-45,5	-65,2
40–70 m	-0,34	1,33	1,0	-2,1	-15,6	-32,6	-49,6	-66,5

**Tabell B2.** Höjdavvägningar för dubb på olika fastigheter i Kungsängen med omnejd, hämtade från uppdrag genomförda av Bjerking samt resultat över sättning, normaliserad sättning och lerdjup

DUBB											
Uppdrag	Fastighet	Byggår	Dubbnamn	Mätstart	Mätslut	# dagar	Total krypsättning (cm)	Normaliserad krypsättning (cm sättning/m lermäktighet)	Lermäktighet (m)	Relativ krypsättning (promille av lerlager som kryper/år)	Kryphastighet (mm/år)
25370	24;7	1923	1,2,3,4,5,6,7,8	2001-08-13	2018-02-08	6023	-4,56	-0,18	25	0,111	-2,8
19212	30;3	1881	15,16,17,18,19	1975-01-01	1995-01-01	7305	-4,34	-0,07	60	0,036	-2,2
13u22518	30;3	1881	15,16,17,18,19	1973-10-05	2013-02-25	14388	-14,78	-0,25	60	0,062	-3,7
17u32781	17;1	1882	35,36,37,38,39,40,41,42,43	2017-08-18	2018-01-12	147	-0,08	0,00	17,5	0,110	-1,9
17u32781	17;2	1942	44,45,46,84	2017-08-18	2018-01-12	147	-0,03	0,00	17,5	0,035	-0,6
24870	13;6	Okänd	8,9,10,24	2001-01-31	2004-03-25	1149	-2,58	-0,09	30	0,273	-8,2
25370	24;7	1923	1,2,3,4,5,6,7,8	2001-08-13	2018-02-08	6023	-4,56	-0,18	25	0,111	-2,8
26000	17;2	1942	6,7,8,9	2002-04-15	2003-08-13	485	-0,30	-0,02	17,5	0,129	-2,3
28012	8;11	1883	29,35,36,37,38,39,40	1998-06-16	2005-05-27	2537	-5,67	-0,13	45	0,181	-8,2
28012	8;2	1865	7,8,9,10	1998-06-16	2005-05-27	2537	-3,25	-0,07	45	0,104	-4,7
28012	8;10	1837	11,12,13,14	1998-06-16	2005-05-27	2537	-3,63	-0,08	45	0,116	-5,2
28012	8;10	1860	15,16,17,18,19	1998-06-16	2005-05-27	2537	-4,60	-0,10	45	0,147	-6,6
28399	30;2	1853	1,2,3,4,5,6,7,8	2005-11-03	2007-11-20	747	-0,78	-0,02	40	0,095	-3,8
28778	35;4	Okänd	7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	2001-04-19	2004-12-10	1331	0,03	0,00	20	-0,004	0,1
55039	8;3	1850	41,42,43,44,45	2011-02-21	2011-06-30	129	-0,34	-0,01	45	0,214	-9,6
55039	8;2	1865	7,8,9,10	1998-06-16	2011-06-30	4762	-5,93	-0,13	45	0,101	-4,5
6549	8;11	1883	12,13	1953-05-05	1979-10-01	9645	-21,15	-0,47	45	0,178	-8,0
6549	8;11	1883	71,72,73,75,79,80,81,82	1977-05-17	1979-10-01	867	-4,45	-0,10	45	0,416	-18,7

**Tabell B3.** Höjdavvägningar för fixpunkter i Kungsängen med omnejd, erhållen från Bjerking samt resultat över sättning, normaliserad sättning och lerdjup

FIX									
Fixpunkt	Beteckning	Mätstart	Mätslut	# dagar	Total krypsättning (cm)	Normaliserad krypsättning (cm sättning/m lermäktighet)	Ler-mäktighet (m)	Relativ krypsättning (promille av lerlager som kryper/år)	Kryp-hastighet (mm/år)
90454	dh	1954-01-01	2001-01-01	17167	-1,50	-0,15	10	0,032	-0,32
90469	dh	1954-01-01	2001-01-01	17167	-2,50	-0,25	10	0,053	-0,53
90004	dh	1936-01-01	1999-01-01	23011	-3,00	-0,30	10	0,048	-0,48
90868	dh	1970-01-01	2000-01-01	10957	-0,10	-0,01	10	0,003	-0,03
90005	dh	1936-01-01	1994-01-01	21185	-9,30	-0,47	20	0,080	-1,60
90460	dh	1954-01-01	1994-01-01	14610	-1,40	-0,05	30	0,012	-0,35
90017	dh	1940-01-01	1994-01-01	19724	-17,80	-0,36	50	0,066	-3,29
90016	dh	1948-01-01	1994-01-01	16802	-19,60	-0,49	40	0,106	-4,26
90018	dh	1936-01-01	1994-01-01	21185	-17,60	-0,35	50	0,061	-3,03
90471	dh	1954-01-01	2001-01-01	17167	-19,40	-0,43	45	0,092	-4,12
90019	dh	1948-01-01	2000-01-01	18993	-12,00	-0,17	70	0,033	-2,31
90472	dh	1954-01-01	1994-01-01	14610	-27,80	-1,39	20	0,347	-6,95
90473	dh	1954-01-01	1994-01-01	14610	-3,00	-0,12	25	0,030	-0,75
90484	rmd	1954-01-01	2014-01-01	21915	-21,00	-0,42	50	0,070	-3,50
91041	dh	1985-01-01	1994-01-01	3287	-0,70	-0,07	10	0,078	-0,78
90605	rmd	1956-01-01	1994-01-01	13880	-1,50	-0,03	50	0,008	-0,39
91053	dg	1984-01-01	1994-01-01	3653	-4,40	-0,09	50	0,088	-4,40
91054	dg	1984-01-01	1994-01-01	3653	0,03	0,01	5	-0,006	0,03
90653	rmd	1976-01-01	1994-01-01	6575	-1,30	-0,13	10	0,072	-0,72

**Tabell B4.** Höjdavvägningar för fixpunkt 90471, dubb 37 på fastighet Kungsängen 8:11 samt dubb 8 på fastighet Kungsängen 8:2 för framtagande av sättning för kvarteret Gudrun i Uppsala

KVARTERET GUDRUN	År	Höjdavvägning RH2000 (m)
Fixpunkt 90471	1954	5,705
	1961	5,665
	1962	5,665
	1984	5,596
	1989	5,588
	1990	5,563
	1991	5,559
	1994	5,549
	2001	5,511
Dubb 37 Kungsängen 8:11	1998-06-16	5,350
	2004-04-06	5,295
	2005-05-27	5,284
Dubb 8 Kungsängen 8:2	1998-06-16	4,935
	2004-04-06	4,903
	2005-05-27	4,898
	2011-02-21	4,872
	2011-06-30	4,868

## BILAGA C – Data från försök med CRS

**Tabell C1.** Erhållna resultat från CRS-försök utförda i Bjerking's laboratorium år 2018 för lerprov Ö10 som tillämpades för beräkning av kryptal  $r_l$  och  $r_o$  med empiriska samband samt för modellering i Geosuite Settlement

CRS								
Lerprov	$w$ (%)	$\sigma_c'$ (kPa)	$\sigma_L'$ (kPa)	$\sigma_{ref}$ (kPa)	$M_L$ (kPa)	$M'$	$C_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (m/s)
Ö10	93	92	135	68,1	630	8	1,70E-08	5,00E-10

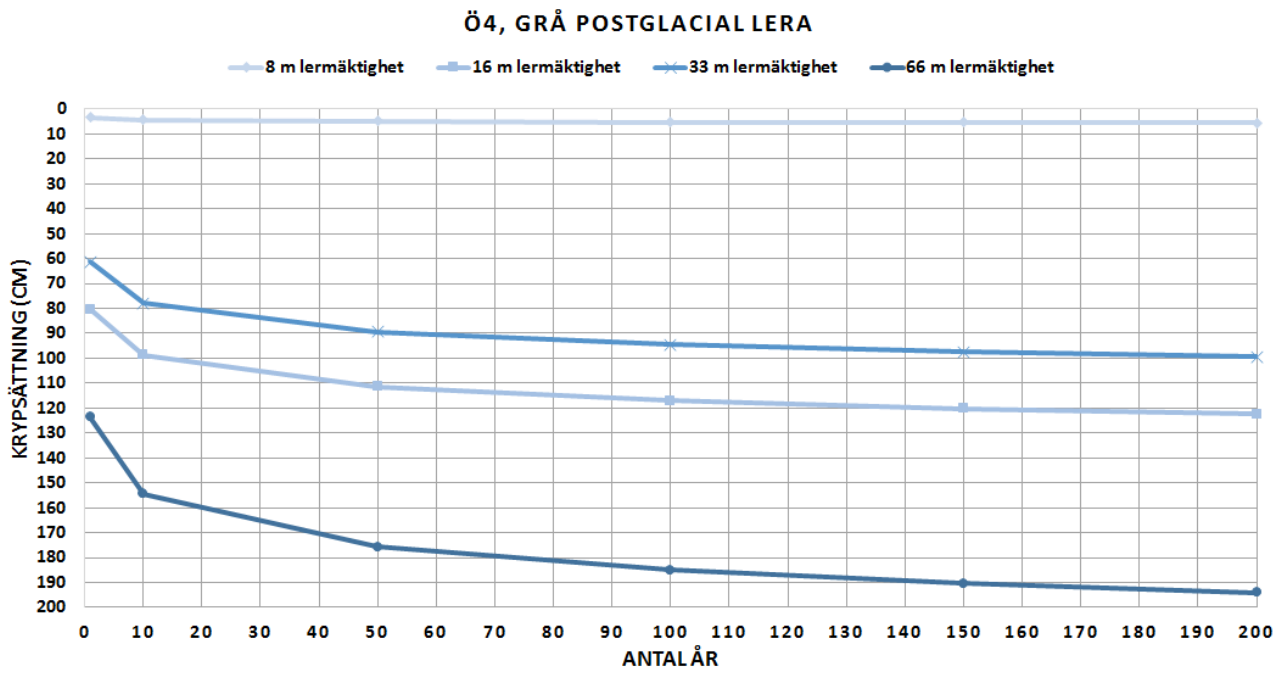
## BILAGA D – Krypning med tidsmotståndsteorin

Tabell D1. Utvärderade kryptal  $r$  baserat på kurvor erhållna från data i bilaga A för respektive lerprov

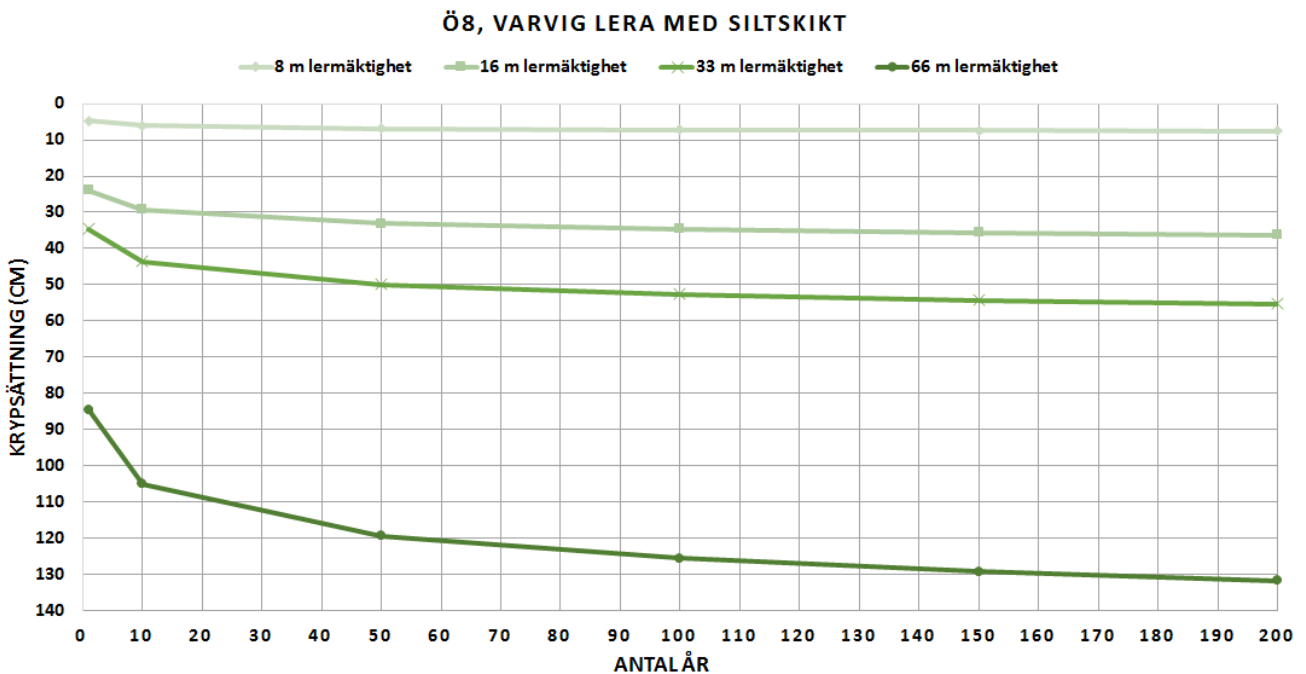
Ö4		Ö8		Ö14		Ö10		Ö34	
Last (kPa)	$r$	Last (kPa)	$r$	Last (kPa)	$r$	Last (kPa)	$r$	Last (kPa)	$r$
26	58373	26	27782	26	32982	40	2118	40	2734
55	2036	55	1431	55	3328	80	118	80	7622
113	203	113	691	113	1863	160	96	160	1483
230	457	230	838	230	517	320	339	320	1094
460	495	460	735	460	1163	640	156	640	1171

Tabell D2. Beräknad kryptöjning och krypsättning för respektive lerprov enligt tidsmotståndsteorin baserat på utvärderade kryppparametrar

Lerprov	Lermäktighet (m)	Tryck (kPa)	Kryptal $r$	KRYPTÖJNING (-)						KRYPSÄTTNING (cm)					
				1 år	10 år	50 år	100 år	150 år	200 år	1 år	10 år	50 år	100 år	150 år	200 år
Ö4	7,9	55	2036	0,0043	0,0055	0,0063	0,0066	0,0068	0,0069	3,4	4,3	4,9	5,2	5,3	5,5
	16,1	113	203	0,0498	0,0611	0,069	0,0724	0,0744	0,0759	80,3	98,6	111,4	117	120,2	122,5
	32,9	230	457	0,0187	0,0237	0,0272	0,0288	0,0296	0,0303	61,4	77,9	89,5	94,5	97,4	99,5
	65,7	460	495	0,0188	0,0235	0,0267	0,0281	0,029	0,0295	123,7	154,3	175,7	184,9	190,2	194,1
Ö8	7,9	55	1431	0,006	0,0076	0,0087	0,0092	0,0095	0,0097	4,7	6	6,9	7,3	7,5	7,6
	16,1	113	691	0,0148	0,0181	0,0205	0,0215	0,0221	0,0225	23,9	29,3	33	34,6	35,6	36,3
	32,9	230	838	0,0105	0,0133	0,0152	0,016	0,0165	0,0168	34,6	43,6	49,9	52,6	54,2	55,4
	65,7	460	735	0,0128	0,016	0,0182	0,0191	0,0197	0,0201	84,4	105	119,4	125,6	129,2	131,8
Ö14	7,9	55	3328	0,0028	0,0035	0,004	0,0042	0,0043	0,0044	2,2	2,8	3,2	3,3	3,4	3,5
	16,1	113	1863	0,0058	0,0071	0,0079	0,0083	0,0085	0,0087	9,4	11,4	12,8	13,4	13,8	14
	32,9	230	517	0,0175	0,0219	0,025	0,0264	0,0272	0,0277	57,4	72	82,3	86,7	89,2	91,1
	65,7	460	1163	0,0081	0,0101	0,0115	0,0121	0,0124	0,0127	53,4	66,4	75,5	79,4	81,7	83,3
Ö10	5,7	40	2118	0,0037	0,0048	0,0055	0,0058	0,006	0,0062	2,1	2,7	3,2	3,3	3,4	3,5
	11,4	80	118	0,0435	0,063	0,0766	0,0825	0,0859	0,0884	49,7	72	87,6	94,3	98,2	101
	22,9	160	96	0,0854	0,1094	0,1262	0,1334	0,1376	0,1406	195,3	250,1	288,5	305	314,6	321,5
	45,7	320	339	0,0252	0,032	0,0367	0,0388	0,0399	0,0408	115	146,1	167,8	177,2	182,6	186,5
91,4	640	156	0,0538	0,0685	0,0789	0,0833	0,0859	0,0878	491,8	626,7	721	761,7	785,4	802,3	
Ö34	5,7	40	2734	0,0029	0,0038	0,0044	0,0046	0,0048	0,0049	1,7	2,2	2,5	2,6	2,7	2,8
	11,4	80	7622	0,0011	0,0014	0,0016	0,0017	0,0018	0,0018	1,3	1,6	1,9	2	2	2,1
	22,9	160	1483	0,006	0,0076	0,0086	0,0091	0,0094	0,0096	13,7	17,3	19,8	20,8	21,4	21,9
	45,7	320	1094	0,0086	0,0107	0,0122	0,0128	0,0132	0,0134	39,3	48,9	55,6	58,5	60,2	61,4
91,4	640	908	0,01	0,0126	0,0143	0,0151	0,0155	0,0159	91,7	114,9	131,1	138,1	142,2	145,1	

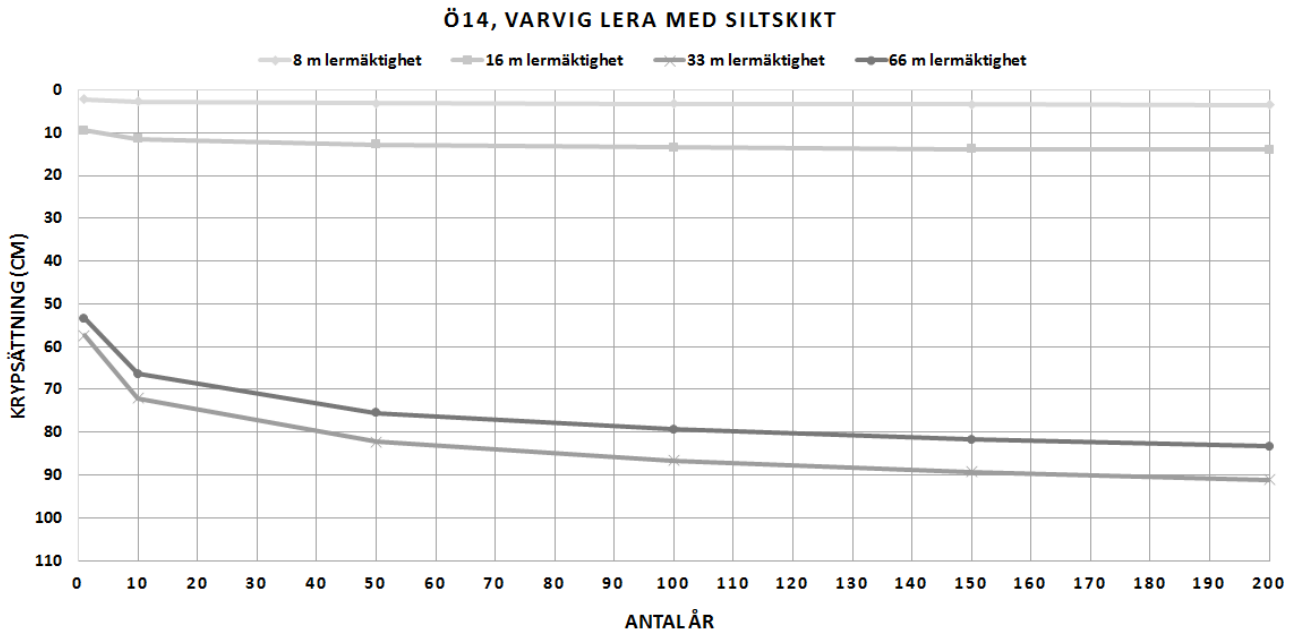


**Figur D1.** Beräknad krypsättning mot antal år för olika lermäktigheter som en last enligt tabell 6 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö4.

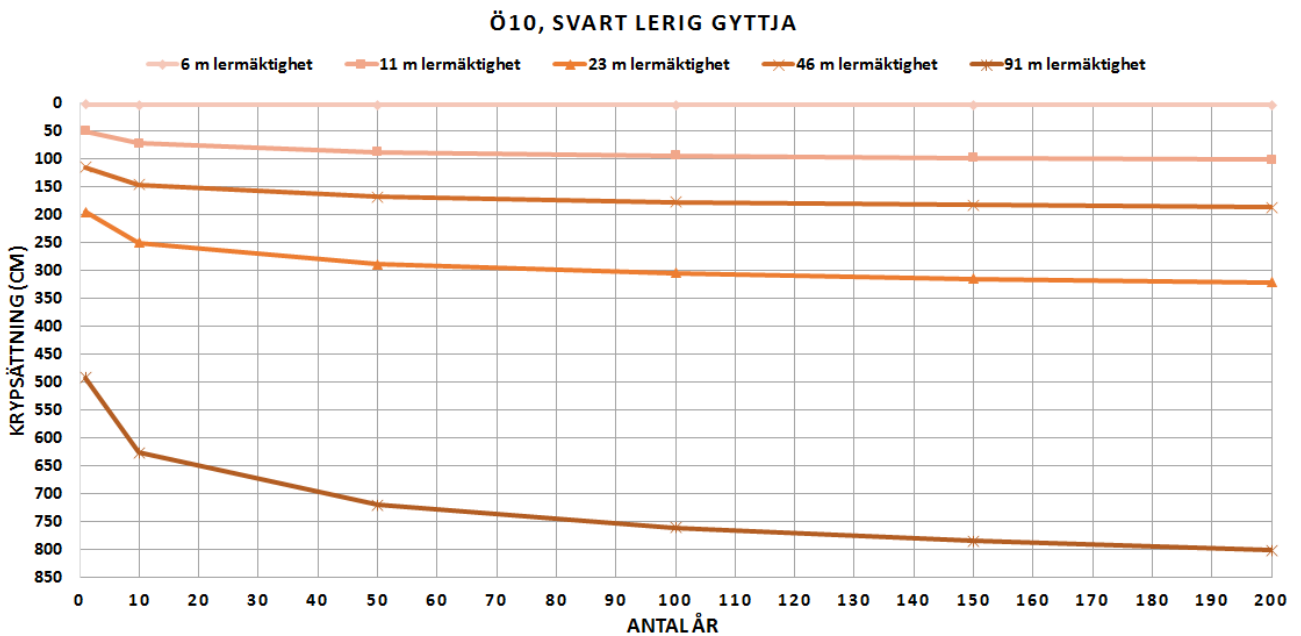


**Figur D2.** Beräknad krypsättning mot antal år för olika lermäktigheter som en last enligt tabell 6 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö8.



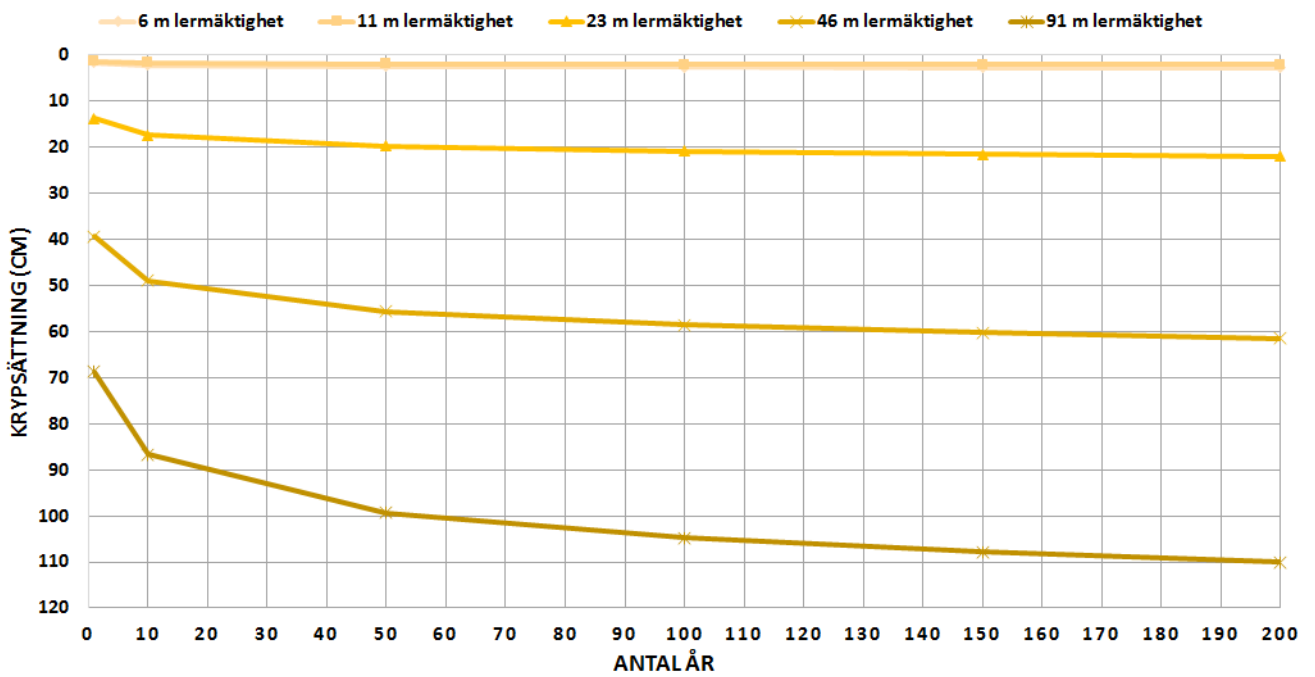


**Figur D3.** Beräknad krypsättning mot antal år för olika lermäktigheter som en last enligt tabell 6 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö14.



**Figur D4.** Beräknad krypsättning mot antal år för olika lermäktigheter som en last enligt tabell 6 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö10.

### Ö34, BRUNGRÅ SILTIG LERA



**Figur D5.** Beräknad krypsättning mot antal år för olika lermäktigheter som en last enligt tabell 6 motsvarar, baserat på erhållna kryppparametrar för lerprov Ö34.