



LUND
UNIVERSITY

METODIK FÖR RISKKLASSIFICERING AV BYGGNADER I SAMBAND MED EN GRUNDVATTENSÄNKNING

ANDERS EMANUELSSON och
MELINA JOHANSSON

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--16/5056--SE (1-54) | ISSN 0349-4977

MASTER'S DISSERTATION

METODIK FÖR RISKKLASSIFICERING AV BYGGNADER I SAMBAND MED EN GRUNDEVATTENSÄNKNING

ANDERS EMANUELSSON och MELINA JOHANSSON

Supervisors: Prof. OLA DAHLBLOM and ERIKA TUDISCO, PhD, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund
together with HENRIK MÖLLER, MSc, Geokonsult AB, Helsingborg.

Examiner: SUSANNE HEYDEN, Senior Lecturer, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund.

Copyright © 2016 Geotechnical Engineering,
Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by Media-Tryck LU, Lund, Sweden, March 2016 (PI).

For information, address:

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

Homepage: www.geoteknik.lth.se

Abstract

During a construction project where excavation is made beneath the water table, it is common to perform a lowering of the water table. The groundwater can be extracted by installed wells in the stratum of water-bearing soil. A lowering of the water table results in a decreased pore pressure and in an increased effective stress in the soil. An increased effective stress results in ground settlements. The magnitude of the settlements depends on the size of the cone of depression and properties of the soil. The greatest drawdown occurs closest to the well. The drawdown is decreased with the distance from the source of dewatering. With an assumption of a uniform soil condition, differential settlements develop in the area affected by the groundwater lowering. Differential settlements can cause damage to adjacent structures within the affected area, the zone of influence. Before a groundwater lowering is initiated an assessment is performed regarding risk of damage to structures. At present, a standardised methodology to assess the risk of damage does not exist in Sweden. There are two standardised methodologies available to assess the risk of damage to structures affected by vibrations and shocks induced by construction activities. According to these standards, a risk assessment of potential damage is made by evaluating factors that affect the sensitivity of structures to vibrations and shocks. Depending on the evaluation, a guidance level of frequency of oscillation can be calculated. The purpose of this master dissertation is to study how a systematised methodology to assess structures can be designed. The prospective methodology shall be general and therefore be able to apply to any kind of construction projects that involves risk of differential settlements.

This report describes how the extent of damage to structures is affected by different soil conditions and properties of the structures. A common damage type to structures is crack development. Cracks appears when the critical strain for a material is reached. When evaluating a potential damage to a structure it is difficult to estimate the critical strain. Instead, the expected inclination of the structure is used. An inclination is defined by the ratio of differential settlement and the distance between two points. The ratio can then be associated with a degree of damage. The result of this study is presented as a general methodology. The methodology describes a course of action to assess risk of potential damage to structures during groundwater lowering. The standardised methodologies regarding vibrations and shocks have been an inspiration when designing the proposed methodology. According to the proposed methodology, a structure is evaluated by a number of factors that affect the capacity to withstand a differential settlement without obtaining damage. Properties of the structure are given points by its capacity. By summing the points, a category can be assigned to the structure. The category defines a value of tolerated inclination to avoid damage. The zone of influence is divided into zones of inclination, according to the expected differential settlements. A structure that is subjected to an inclination larger than its tolerated inclination, is defined as a structure at risk. Evaluated factors in the proposed methodology are based on a literature study. Assessed factors are the length of the building as well as type of foundation, framework and facade. The length of the building is considered to have a relatively large impact on the extent of damage, due to the fact that a longer building, compared to a shorter, undergoes a larger distortion when subjected to a differential settlement.

The conclusion of this study is that it is possible to assess the risk of damage to structures by using a general methodology. Such a methodology enables to determine the number of structures at risk before initiating a groundwater lowering. A general methodology is proposed and can be a starting point of development of a standard.

Keywords: *Groundwater lowering, risk assessment, methodology, damage, structures, zone of influence, differential settlements*

Sammanfattning

En styrd grundvattensänkning är ett vanligt inslag i byggprojekt där markarbeten sker under grundvattennivån. Under byggtiden sänks grundvattennivån genom att grundvatten pumpas upp genom installerade brunnar. En sänkning av grundvattennivån minskar portrycket och ökar effektivspänningen i jorden vilket medför marksättningar. Storleken på marksättningar beror på avsänkningens storlek och jordegenskaper. Avsänkningen är störst vid den installerade brunnen och avtar med avståndet från uttagsplatsen. Vid antagande om en homogen jordstruktur minskar således sättningens storlek med avståndet från uttagsplatsen. En styrd grundvattensänkning ger av denna anledning upphov till differenssättningar inom påverkansområdet. Differenssättningar kan ge upphov till skador på befintliga byggnader. Inför en styrd grundvattensänkning utvärderas risken för skador på omkringliggande byggnader. I dagens läge finns ingen standard, eller en för branschen gemensam metod, som beskriver ett tillvägagångssätt för riskklassificering vid en styrd grundvattensänkning. För bedömning och riskklassificering av byggnader vid arbeten som inducerar vibrationer och stötar, exempelvis sprängning och markarbeten finns det idag två stycken gällande standarder. Enligt standarderna bedöms faktorer som har en inverkan på en byggnads kapacitet att motstå skador. Ett riktvärde för tillåten vertikal svängningshastighet kan därefter beräknas. Syftet med detta examensarbete är att studera hur en systematiserad metodik för riskklassificering av byggnader kan utformas. Metodiken ska vara generell och kunna tillämpas oberoende typ av byggprojekt som ger upphov till differenssättningar.

Rapporten beskriver följder som kan uppstå på byggnader samt hur olika markförhållanden och byggnadsegenskaper påverkar omfattningen av en skada. Vanliga skador på byggnader är sprickor. Sprickorna uppstår när materialets kritiska töjning uppnås. Den kritiska töjningen är en svår parameter att uppskatta vid en riskklassificering av byggnader. Istället för den kritiska töjningen förutses lutningen, det vill säga förhållandet mellan differenssättning och avståndet mellan två punkter. Förhållandet kan sedan kopplas till troliga skador på en byggnad. Rapporten resulterar i ett förslag på en systematisk metodik för riskklassificering av byggnader. Inspiration till utformning av metodiken har hämtats från de tidigare nämnda standarderna. I metodiken bedöms en byggnad utifrån ett antal faktorer som påverkar byggnadens kapacitet att genomgå en differenssättning utan att erhalla skador. En byggnads egenskaper tilldelas poäng beroende på dess kapacitet. Poängsumman resulterar i att byggnaden placeras i en byggnadskategori med en tillhörande tillåten lutning för byggnaden. För att undvika skada bör lutningen för byggnaden inte överstiga detta värde. Området som påverkas av grundvattensänkningen delas in i så kallade lutningszoner utifrån den förväntade sättningsprofilen. En byggnad klassificeras som ett riskobjekt om den är placerad i en lutningszon där markens lutning förväntas överskrida den tillåtna lutningen enligt tidigare tilldelad byggnadskategori. En litteraturstudie har lett fram till ett flertal faktorer som påverkar omfattningen av en skada. Faktorerna som bedöms i metodiken är byggnadens längd, typ av grundläggning, stommaterial och fasad. Byggnadens längd bedöms ha en stor inverkan då en lång byggnad i högre grad än en kortare behöver krökas för att följa den ojämna sättningsprofilen. Föreslagen metodik har utvärderats genom att praktiskt tillämpas på byggnader som är aktuella i ett byggprojekt med grundvattensänkning.

Slutsatsen av arbetet är att det är möjligt att genom en generell metodik bedöma risken för skador på byggnader innan ett byggprojekt och en styrd grundvattensänkning inleds. Föreslagen riskklassificering utförs genom att ett antal byggnadsegenskaper bedöms utifrån hur de påverkar byggnadens kapacitet att genomgå en differenssättning. Med hjälp av metodiken kan riskobjekt tidigt identifieras. Den föreslagna metodiken kan vara vägledande till en framtida utformning av en standard.

Nyckelord: *Styrd grundvattensänkning, riskklassificering, riskanalys, metodik, skador, byggnader, påverkansområde, differenssättning*

Förord

Denna rapport är en del av ett examensarbete inom Civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och är utfört gemensamt under hösten 2015 i samarbete med Geokonsult AB samt Institutionen för byggvetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet.

Vi vill tacka vår handledare Henrik Möller, Geokonsult AB (tidigare vid Tyréns AB), för hjälp med frågeställning till arbetet, svar vid frågor samt för tillhandahållet material. Ett tack riktas även till våra handledare inom universitetet, Professor Ola Dahlblom och Erika Tudisco, teknisk doktor, Institutionen för Byggvetenskaper, för vägledning under utförandet och konstruktiv kritik.

Slutligen riktas ett stort tack till familj och vänner för stöd under examensarbetet och studietiden.

Anders Emanuelsson, Melina Johansson

Lund, 2016

Notation

E – elasticitetsmodul (MPa)

F_b – korrigeringsfaktor byggnad

F_d – korrigeringsfaktor avstånd

F_g – korrigeringsfaktor grundkonstruktion

F_m – korrigeringsfaktor material

F_t – korrigeringsfaktor verksamhet

h – ett jordlagers tjocklek (m)

M – kompressionsmodul (MPa)

Q – flödet av grundvatten från en uttagsbrunn (m^3/s)

u – portryck (kPa)

v – tvärkontraktionstal

v_0 – okorrigerad vertikal svängningshastighet (mm/s)

v_1 – tillåten vertikal svängningshastighet (mm/s)

γ_w – vattnets tunghet (kN/m^3)

δ – sättning (m)

δ_v – ett jordlagers totala kompression i vertikalled (m)

Δu – förändring av portryck (kPa)

Δz – skillnad mellan befintlig och ny grundvattennivå, $z_0 - z_1$ (m)

$\Delta \delta$ – sättningsdifferens mellan två punkter, $\delta_1 - \delta_0$ (m)

$\Delta \sigma'_v$ – förändrad effektivspänning (kPa)

ε – resulterande töjning av ett jordelement

θ – lutning av en byggnad

σ_v – ett jordelements spänning i vertikalled (kPa)

σ'_v – ett jordelements effektivspänning i vertikalled (kPa)

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Frågeställning och metod.....	2
1.3	Avgränsningar.....	2
2	Teori kring grundvattensänkning.....	3
2.1	Jordegenskaper.....	3
2.2	Grundvattensänkning i byggprojekt.....	6
2.3	Grundvatten i olika geologiska enheter.....	8
2.4	Modeller för en styrd grundvattensänkning.....	10
2.5	Marksättningar till följd av grundvattensänkningar.....	11
2.6	Sättningsprofil vid en grundvattensänkning.....	17
3	Riskklassificering idag.....	19
3.1	Riskklassificering av byggnader vid styrd grundvattensänkning.....	19
3.2	Bedömning av byggnader enligt dagens standarder.....	25
3.3	Faktorer med inverkan på omfattning av eventuell skada.....	28
4	Metodik för riskklassificering.....	31
4.1	Inledning.....	31
4.2	Riskklassificering.....	31
4.3	Diskussion kring föreslagen metodik.....	37
5	Praktisk tillämpning.....	39
5.1	Bedömning enligt föreslagen metodik och konsultbolag.....	39
5.2	Utvärdering av bedömning.....	39
5.3	Slutlig kommentar.....	42
6	Diskussion och slutsats.....	43
6.1	Diskussion kring resultatet.....	43
6.2	Praktisk tillämpning.....	44
6.3	Slutsats.....	44
6.4	Idéer till fortsatt arbete.....	45
7	Referenser.....	47

1 Inledning

I detta kapitel beskrivs bakgrunden till denna rapport och syftet med dess innehåll. Kapitlet innehåller även en beskrivning av rapportens metod och avgränsningar.

1.1 Bakgrund

Arbeten under grundvattenytans nivå är vanliga inom anläggnings- och byggnadsprojekt, exempelvis vid tunnelbyggande eller grundläggning av en byggnad. För att kunna garantera en säker arbetsplats vid dessa byggprojekt måste grundvattnet ledas bort. Att leda bort grundvattnet är även nödvändigt av praktiska skäl då arbeten ska utföras under grundvattenytan. Ett problem som kan uppkomma till följd av en grundvattensänkning är ojämna sättningar vilket kan leda till skador på omkringliggande byggnader. Vid ett byggprojekt identifieras i ett tidigt stadium de byggnader som påverkas av projektet. För att kunna bedöma kostnader för förebyggande och reparerande åtgärder i samband med byggprojektet utförs en förstudie där berörda byggnader identifieras och eventuella förebyggande åtgärder bestäms.

Syftet med detta examensarbete är att arbeta fram en generell metodik för att riskklassificera byggnader vid en styrd grundvattensänkning och efterföljande marksättning. Metodiken är avsedd att användas under inledande förstudier för att bestämma antalet riskobjekt. Rapporten beskriver möjliga effekter av en grundvattensänkning som ger upphov till marksättning, där fokus ligger på ökad effektivspänning som är en oundviklig effekt vid sänkt porttryck. Arbetet behandlar hur olika geologiska enheters struktur och egenskaper påverkar den resulterande sättningen. Vidare beskrivs typiska skador som kan uppstå på byggnader inom ett påverkansområde. Målgruppen för rapporten är konsulter inom branschen med ansvar för bedömning av potentiella skador på byggnader vid en styrd grundvattensänkning.

Utgångspunkt för rapporten är att det idag saknas en standard för bedömning av påverkan på byggnader orsakad av en styrd grundvattensänkning. Motsvarande standarder finns idag vid sprängningsinducerade vibrationer (Swedish Standards Institute, 2011) samt vid vibrationer orsakade av markarbeten (Standardiseringen i Sverige, 1999). Dessa standarder beskriver en arbetsgång för riskanalys och framtagning av riktvärden för tillåten vertikal svängningshastighet.

För att kunna bestämma ett projekts budget krävs en detaljerad förstudie utan att det förberedande arbetet fördröjer projektet i en alltför hög grad. En detaljerad förstudie kan minska oväntade inslag under projektets gång och därmed risken för en för lågt satt projektkostnad. Alternativt att ett projekt aldrig genomförs på grund av en felbedömd, för hög, projektkostnad. Denna rapport kan bidra till en större förståelse för vilka följder som kan förväntas på omkringliggande byggnader vid en styrd grundvattensänkning. En kunskapsökning inom ämnet och en metodik för riskklassificering av byggnader kan minska tidsåtgång och kostnad för en riskanalys. En systematisk metodik kan även medföra att subjektiva bedömningar undviks och att branschen sammanförs i ett arbetsätt. Examensarbetet kan vara vägledande till en framtida utformning av en standard för riskklassificering.

1.2 Frågeställning och metod

I denna rapport undersöks hur en systematiserad, generell metodik för riskklassificering av byggnader i samband med en styrd grundvattensänkning kan utformas. För att kunna svara på arbetets frågeställning krävs kunskap om vilka följder en styrd grundvattensänkning kan ge på byggnader, samt hur olika markförhållanden och byggnadsegenskaper påverkar omfattningen på en eventuell skada. För att besvara frågeställningen utförs en litteraturstudie. En litteraturstudie är även vägledande för utformning av en föreslagen metodik. Föreslagen metodik utvärderas genom att praktiskt tillämpas på byggnader som är aktuella i ett byggprojekt med en grundvattensänkning.

1.3 Avgränsningar

Syftet med detta examensarbete är att arbeta fram en generell metodik för att riskklassificera byggnader vid en styrd grundvattensänkning. Rapporten beskriver inte hur sättningsberäkningar för ett påverkansområde genomförs eller hur en geomodell eller en avsänkningstratt tas fram. En föreslagen metodik för riskanalys av byggnader är tänkt att tillämpas i inledande förstudier. Därmed är arbeten såsom begränsning av förväntade sättningar eller uppföljningsarbete såsom kontrollmätningar under eller efter ett byggprojekt inte inkluderade. Metodiken omfattar inte tekniska råd gällande val av metod för grundvattensänkningen. Vidare avgränsas rapporten till skador på byggnader. Skador på övriga riskobjekt, såsom broar, ledningar och vägar eller påverkan på vegetation och miljö behandlas ej. Rapporten fokuserar på marksättningar till följd av en styrd grundvattensänkning med installerade brunnar för vattenuttag. En grundvattensänkning orsakad av inläckage, exempelvis vid tunnelarbeten, behandlas ej.

2 Teori kring grundvattensänkning

Följande kapitel beskriver jordegenskaper som påverkar storleken på marksättningen vid en grundvattensänkning. Vidare beskrivs grundvattensänkning i byggprojekt samt hur grundvatten kan förekomma i olika geologiska enheter beroende på vattenförande förmåga. Kapitlet avslutas med en beskrivning av projektspecifika modeller som används för att beräkna storlek på marksättning och utbredning av påverkansområde.

2.1 Jordegenskaper

Nedan beskrivs några av de jordegenskaper som påverkar flödet av grundvatten samt storleken på marksättningar vid en grundvattensänkning. Jordstruktur, permeabilitet och porositet samt begreppen friktionsjord och kohesionsjord redovisas. Avsnittet innehåller även en beskrivning av parametrar som används vid sättningsberäkningar.

2.1.1 Jordstruktur

En jord är uppbyggd av tre olika faser; fast-, flytande- och gasfas. Den fasta fasen består av mineral- och lerpartiklar vilket bildar det lastbärande skelettet. I den fasta fasen kan också organiskt material ingå. Mellan de fasta partiklarna i skelettet finns hålrum som bildar jordens porsystem vilket innehåller vatten eller gas eller en blandning av båda. Jordens kornstorlek påverkar dess egenskaper såsom permeabilitet, kapillaritet och möjlighet till att magasinera vatten (Larsson, 1989). De fasta partiklarna i en jord delas in och klassificeras efter kornstorlek enligt tabell 2.1. Jordar med en finkornig struktur, såsom ler och silt, benämns som kohesionsjord. Sand och grövre jordar benämns som friktionsjord. Kohesionsjord och friktionsjord har skilda egenskaper i hållfasthet och vattenförande förmåga (Sällfors, 2009).

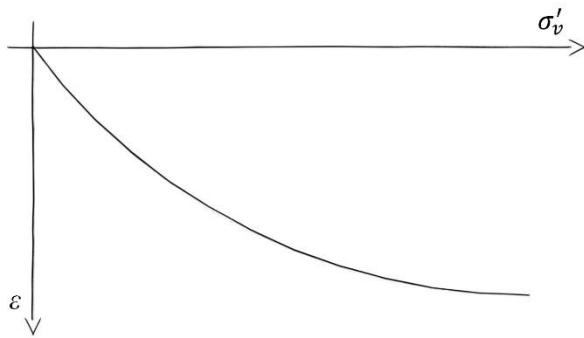
Tabell 2.1 – Klassificering av jord utifrån kornstorlek (IEG 2011).

Kornstorlek												
	0,002	0,0063	0,02	0,063	0,2	0,63	2	6,3	20	63	200	mm
	Fin-silt	Mellan-silt	Grov-silt	Fin-sand	Mellan-sand	Grov-sand	Fin-grus	Mellan-grus	Grov-grus			
Ler		Silt			Sand			Grus			Sten	Block

2.1.2 Egenskaper för friktionsjord respektive kohesionsjord

Kornskelettet i en friktionsjord byggs upp av kontakt och friktion när kornen stöds av varandra. Det är friktionen i kornskelettet som ger jorden dess hållfasthet. De större kornen i en friktionsjord bidrar till en öppen porstruktur med en hög permeabilitet och en dränerande förmåga (Larsson, 1989). Friktionen mellan kornen i en kohesionsjord kan försummas. Hållfastheten i en kohesionsjord byggs istället upp av molekylära attraktionskrafter mellan de små jordpartiklarna. Hållfastheten kallas kohesion. Permeabilitet följer generellt kornstorleken i jorden vilket gör att kohesionsjordar har en låg vattenförande förmåga (Sällfors, 2009).

Vattenmättad friktions- och kohesionsjord komprimeras vid belastning, dock med olika deformationsföljder. Hos båda jordarterna sker en volymminskning, en konsolidering, då belastningen pressar ut vatten ur jorden. Konsolideringen fortgår tills att jorden åter nått en jämvikt (Preene, 2012). I friktionsjordar trycks de fasta partiklarna hårdare mot varandra vid en belastning, jorden sägs därför vara deformationshårdnande, se figur 2.1 som visar hur töjning, ϵ , av en friktionsjord inte ökar linjärt med ökad spänning, σ'_{v} .



Figur 2.1 – Principfigur för spännings- och töjningsdiagram för en friktionsjord.

Den höga permeabiliteten som är signifikant för friktionsjord gör att konsolideringen sker momentant. I en lågpermeabel kohesionsjord är däremot deformationsförloppet mer komplicerat. Den låga permeabiliteten gör att konsolideringen tar tid och att volymminskningen blir tidsberoende (Sällfors, 2009). Vid exempelvis en grundvattensänkning i en mark med olika jordlager, friktions- respektive kohesionsjord, kan sättningen delas in i två delar utefter tidens påverkan på den resulterande sättningen. Först sker en momentan sättning, främst i friktionsjorden, som anses ske parallellt med sänkningen av grundvattennivån. Därefter följer en fördröjd sättning som sker i lagret av kohesionsjord (Leca & New, 2006).

2.1.3 Permeabilitet

Hydraulisk konduktivitet är ett mått på hur lätt vatten strömmar genom en porös massa. Parametern benämns dock ofta permeabilitet inom geoteknik och vid arbeten med grundvattensänkning. Permeabilitet beskriver med andra ord markens vattengenomsläpplighet, enhet meter/sekund, och är en viktig parameter för att beskriva vattenflöde. Det finns olika metoder att tillgå för att bestämma ett jord- eller berglagets permeabilitet, vanligtvis beräknas permeabiliteten enligt Darcys lag. Bestämning kan ske både genom laborietester och in-situ, till exempel genom test i borrhål eller genom propumpning. Det är dock komplicerat att få fram tillförlitliga värden på permeabiliteten (Preene, 2012). Detta beror på att jordlager sällan är homogena och isotropa, med likartad struktur och egenskaper i samtliga riktningar, vilket leder till att även permeabiliteten är olika i olika riktningar (Fetter, 2001). För enkelhetens skull antas ett jordlager vara homogent och isotropt vilket i regel ger tillräckligt bra värde för beräkning vid en grundvattensänkning (Preene, 2012).

Permeabilitet hos en jordmassa är beroende av dess kornstorlek, sorteringsgrad, packning samt dess lagerföljd (Knutsson & Morfeldt, 2002). En enhetlig, grövre jord med få inslag av små korn har större håligheter vilket förenklar vattenströmning (Preene, 2012). Grovt isälvsgrus som är väl sorterat och löst lagrat är ett exempel på jord med hög permeabilitet (Knutsson & Morfeldt, 2002). Om samma jord blandas upp med finkornig jord, fyller dessa korn håligheterna vilket minskar vattnets möjlighet till transport och permeabiliteten blir därmed lägre (Preene, 2012). Stenig, grusig, sandig morän som är osorterad och hårt packad är exempel på lågpermeabel jord. Exempel på en jordart med praktiskt taget obefintlig permeabilitet kan vara finkornig sedimentär lera (Knutsson & Morfeldt, 2002). I tabell 2.2 visas typiska permeabiliteter för olika jordmaterial (Preene, 2012).

Tabell 2.2 - Typiska värden på permeabilitet för olika jordmaterial (Preene, 2012).

Typ av material	Typklassifikation av permeabilitet	Permeabilitet (m/s)
Rent grus	Hög	$>1 \cdot 10^{-3}$
Ren sand och blandning av sand/grus	Hög till måttlig	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$
Fin- och mellansand	Måttlig till låg	$1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$
Siltig sand	Låg	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$
Sandig silt, väldigt siltig finsand, samt laminerade eller mixade skikt av silt/sand/lera	Låg till väldigt låg	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$
Sprucken eller laminerad lera	Väldigt låg	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$
Intakt lera	Praktiskt taget impermeabel	$<1 \cdot 10^{-9}$

Utöver permeabiliteten hör också porositeten till de grundläggande begreppen inom grundvattenteknik. Den totala porositeten avser andelen sammanlagd porvolym av den totala jordvolymen och anges i procent. Den andel av den totala porvolymen som är tillgänglig för grundvattenflöde beskrivs som den effektiva porositeten (Knutsson & Morfeldt, 2002).

2.1.4 Kompressionsmodul

Förhållandet mellan spänning och töjning i vertikalled vid påförd belastning kan uttryckas som en kompressionsmodul eller som en elasticitetsmodul, beroende på om horisontella töjningar förhindras eller tillåts uppkomma. Vid bestämning av kompressionsmodul belastas ett jordprov vertikalt medan horisontella töjningar förhindras. Kompressionsmodulen tillämpas vid sättningsberäkningar då horisontella töjningar i jorden är förhindrade (Larsson, 1989). Storleken på kompressionsmodulen, M , är beroende på om det är en friktions- eller kohesionsjord. Kompressionsmodulen, M , kan beskrivas som,

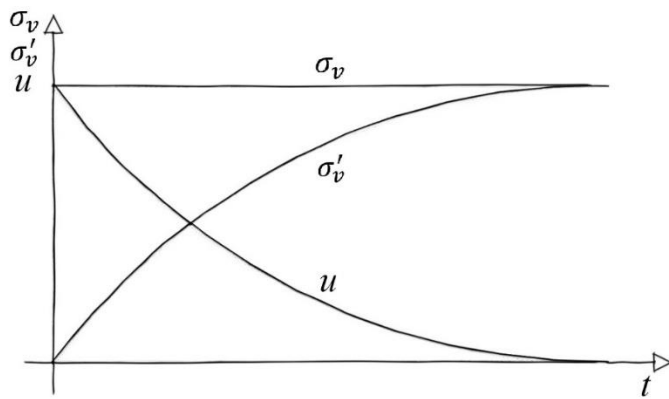
$$M = \frac{\sigma'_v}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

där σ'_v är påförd spänning och ε är resulterande töjning. För en friktionsjord anses förhållandet linjärt och ett bestämt värde för modulen kan tillämpas. Modulen för en kohesionsjord är mer komplicerad då den är beroende av vilken belastning som jorden tidigare varit utsatt för (Trafikverket, 2014a).

2.1.5 Spänning i jord

Ett jordelement i marken är utsatt för spänningar i både vertikal- och horisontalled. Den vertikala spänningen är ofta störst. Summan av de vertikala spänningar som ett jordelement utsätts för, egentyngd och eventuell last på markytan, benämns totalspänning. Totalspänningen bärs upp av både kornskelettet och vätskan i jorden, se figur 2.2. Den del av den totala spänningen som bärs av kornskelettet benämns effektivspänning. Sättnings storlek är vid en grundvattensänkning beroende av hur effektivspänningen förändras i jorden när grundvattnet sänks. Den resterande delen av totalspänningen bärs upp av portrycket i jorden. Totalspänningen, σ_v , uttrycks som effektivspänningen σ'_v , adderad med jordens portryck, u , det vill säga

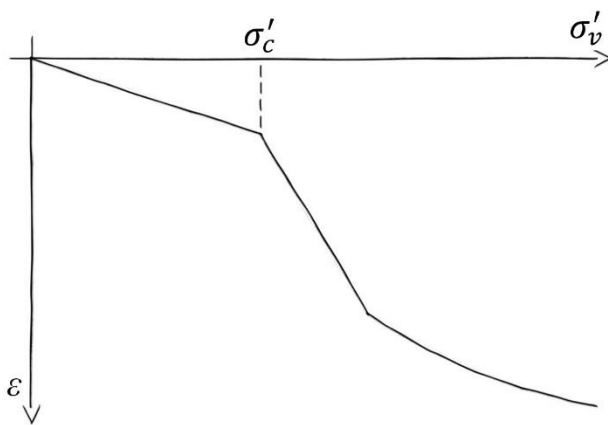
$$\sigma_v = \sigma'_v + u \quad (2.2)$$



Figur 2.2 – Totalspänningen, σ_v , byggs upp av både effektivspänningen, σ'_v , och portrycket, u , i jorden. Portrycket minskar och effektivspänningen ökar under konsolideringen medan totalspänningen är konstant.

Förkonsolideringstryck

Den högsta effektivspänning en kohesionsjord har utsatts för benämns förkonsolideringstryck, σ'_c . Om aktuell effektivspänning understiger förkonsolideringstrycket är jorden överkonsoliderad. Belastning av en överkonsoliderad jord ger en elastisk deformation fram till förkonsolideringstrycket. En elastisk deformation innebär kompression av en jords kornskelett utan att konsolidering sker. Om aktuell effektivspänning är lika med eller större än förkonsolideringstrycket, minskar styvheten och jorden benämns som normalkonsoliderad (Sällfors, 2009). Figur 2.3 visar en principfigur över spännings- och töjningsdiagram av en kohesionsjord, förkonsolideringstrycket, σ'_c , är markerat.



Figur 2.3 – Spännings- och töjningsdiagram för en kohesionsjord med markerat förkonsolideringstryck.

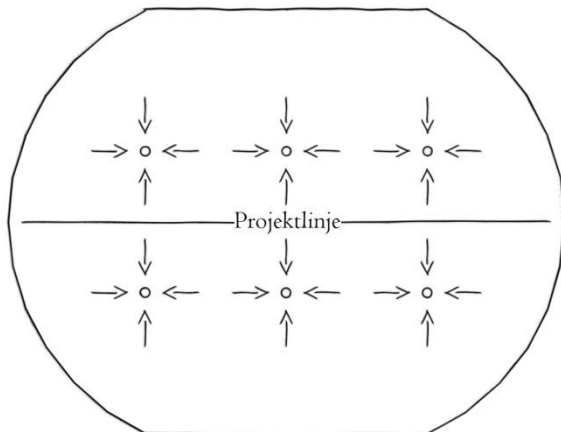
2.2 Grundvattensänkning i byggprojekt

Vid ett anläggnings- eller byggnadsprojekt med arbeten under grundvattenytan krävs att grundvattnet leds bort av praktiska skäl samt för att uppnå en säker arbetsplats. Exempel på projekt där en grundvattensänkning kan vara aktuell är (Powers, 1985):

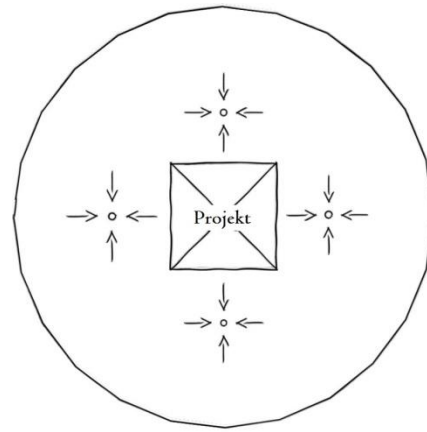
- Infrastrukturprojekt, exempelvis ett tunnelbygge
- Grundläggning av en byggnad
- Gruvprojekt

Vid en utgrävning i en genomtränglig jord, en jord med hög permeabilitet, krävs att grundvattnet pumpas upp från utgrävningen. I en lågpermeabel jord är inflödet av grundvatten ofta försumbart vilket gör att pumpning inte är nödvändig (D'Appolonia, 1971). En grundvattensänkning kan utföras på ett flertal sätt med skillnad i kostnad och effektivitet. Exempel på metoder som används vid hantering av grundvatten är öppen pumpning, avskärmning av grundvattnet och fördränering. Öppen pumpning innebär att inträngande vatten samlas upp i ett dike inne i utgrävningen innan det pumpas ut. Till detta krävs en pump med tillräcklig kapacitet samt ett reservsystem för att säkra driften. Denna metod är den billigaste men begränsas av att jorden inte är känslig för vattengenomströmning. Att avskärma grundvattnet kan innebära att driva ner en vattentät spont eller att frysa marken, vilket innebär en större kostnad än en öppen pumpning. Fördränering innebär att brunnar med pumpar installeras innan utgrävningen börjar (Powers, 1985). Fördränering benämns i denna rapport som en styrd grundvattensänkning.

Vid en styrd grundvattensänkning påverkas utformningen av påverkansområdet bland annat av uppställningen av installerade brunnar. Vid utsträckta projekt, exempelvis ett tunnelbygge, är det vanligt att brunnarna arrangeras i linjer på vardera sidan om tunnelns sträckning. Flödet av grundvatten är vinkelrätt mot brunnslinjerna vilket förenklat leder till en rektangulär form på påverkansområdet. Figur 2.4 visar en principfigur för ett utsträckt projekt där brunnarna är markerade med ringar. Pilar visar flödet av grundvatten till brunnarna. Vid grundläggning av en byggnad placeras istället brunnar i en cirkel kring byggarbetsplatsen. Flödet är vinkelrätt mot de arrangerade brunnarna och förenklat blir påverkansområdet en cirkel (Preene, 2012). Figur 2.5 visar en principfigur för påverkansområdet där brunnarna är markerade med ringar. Pilar visar flödet av grundvatten till brunnarna.

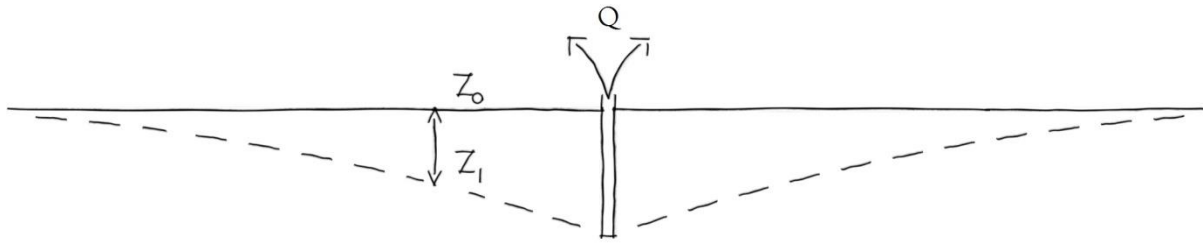


Figur 2.4 - Påverkansområde vid grundläggning av exempelvis en tunnel.



Figur 2.5 - Påverkansområde vid grundläggning av exempelvis en byggnad.

Påverkansområdets principiella utformning i profil är oberoende av pumpformation. Profilen av påverkansområdet kan beskrivas med en trattform, därav benämningen avsänkningstratt (Preene, 2012). Figur 2.6 visar en avsänkningstratt där Q är flödet från uttagsbrunnen, z_0 är den ursprungliga grundvattennivån och z_1 är den nya grundvattennivån.



Figur 2.6 – En principiell avsänkningsträtt med flödet Q , ursprunglig grundvattennivå z_0 och ny grundvattennivå z_1 .

En sänkning av grundvattenytan kan medföra oönskade effekter. Nedan listas exempel på problem som kan uppkomma (Powers, 1985):

- Sättning av komprimerbar jord till följd av den ökade effektivspänningen som avvattningen medför
- Marksättningar på grund av okontrollerad hantering av grundvattenflödet – jordmassor rasar in i utgrävningen
- Uttömning av grundvattentäkter
- Inträngning av saltvatten i sötvattenakviferer, vid grundvattensänkning i kustområde eller vid en saltvattenkälla
- Spridning av markgifter vid ett ökat grundvattenflöde
- Träpålar eller rustbäddar blottas och ruttnar vid fri exponering till syre
- Skadad vegetation och våtmark

2.3 Grundvatten i olika geologiska enheter

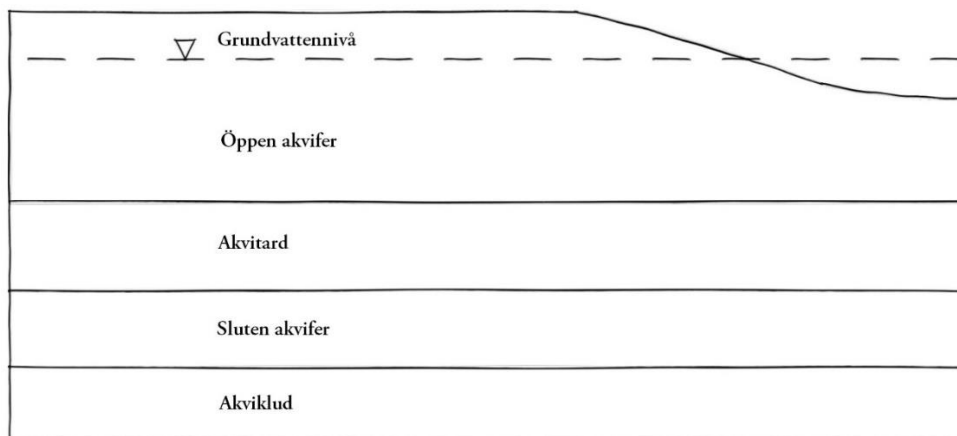
Jord- och bergarter kan delas in i geologiska enheter beroende på deras vattenförande förmåga. Nedan beskrivs olika enheter med egenskaper och typiska uppbyggnadsmaterial.

2.3.1 Öppna och slutna akviferer

Enligt Preene (2012) är en akvifer ett lager av jord- eller bergmaterial som har en hög permeabilitet och vattenförande egenskaper. En akvifer definieras enligt SFS (2004:660) på följande sätt: "lager av geologiska material som är tillräckligt porösa och genomsläppliga för att medge ett betydande flöde eller uttag av grundvatten". Detta betyder att i en akvifer kan brunnar installeras för uttag av användbara mängder vatten. Tillrinning till lagret ska samtidigt kunna ske i en tillräckligt stor omfattning (Preene, 2012).

En akvifer kan antingen vara öppen eller sluten. En öppen akvifer kännetecknas av att toppen på akviferen är fritt förbunden med atmosfären. Det hydrostatiska trycket vid grundvattenytan är därmed lika med atmosfärstrycket. Grundvattenytan i en akvifer kan bestämmas genom installering av en observationsbrunn. Den höga permeabiliteten i akviferen medför att brunnen relativt snabbt fylls och grundvattennivån kan avläsas (Knutsson & Morfeldt, 2002). Under grundvattenytan anses jorden vara mättad, över ytan kan det vara både en omättad och en mättad zon. Strömning av grundvatten i en akvifer sker huvudsakligen i det horisontella planet (Preene, 2012). Typiska material i en akvifer är grov sand och grus (Knutsson & Morfeldt, 2002).

Karakteriserande för en sluten akvifer är att den överlagras och bäddas in av ett lager med väldigt låg eller obefintlig permeabilitet, benämnd som akvitard, akviklud eller akvifug beroende på vattenförande förmåga (Preene, 2012). Om grundvattenytan finns i det täckande lagret har inte grundvattnet fri kontakt med atmosfären, trycket kan därför vara högre än atmosfärstrycket. Att mäta grundvattennivån i det täckande lagret med en installationsbrunn skulle ta väldigt lång tid då permeabiliteten är väldigt låg. Istället mäts portrycket i akvitarden alternativt i underliggande akvifer som redovisar en tryckskillnad mellan nivå för mätning och nolltrycksnivån, den sökta grundvattenytan. Nivån benämns som den piezometriska alternativt potentiometriska grundvattenytan (Knutsson & Morfeldt, 2002). Figur 2.7 visar principen för en öppen akvifer som är fritt förbunden med atmosfären samt för en sluten akvifer som överlagras av en akvitard.



Figur 2.7 - Principfigur för en öppen akvifer, akvitard, sluten akvifer och en akviklud.

2.3.2 Akvitard, akviklud och akvifug

Akvitard, akviklud och akvifug är geologiska enheter med låg- eller obefintlig permeabilitet. Skillnaden mellan de tre enheterna är deras vattenförande förmåga. En akvitard kan lagra samt långsamt transportera vatten mellan akviferer (Fetter, 2001). Den låga permeabiliteten och därmed det låga grundvattenflödet gör akvitarden till en opassande källa för installation av brunnar. Permeabiliteten är dock så pass hög så att akvitarden inte kan benämnas som impermeabel. Jordarter som kan forma akvitarder är exempelvis silt, finkornig sand, skiktad lera och skiktad silt. Även vissa impermeabla enheter såsom lera och berg kan benämnas som akvitarder, vid inslag av skiktningar eller sprickor som kan transportera vatten. Om en akvitard förekommer ovan en sluten akvifer som pumpas på vatten, kommer vatten att strömma från akvitarden ned till akviferen. Strömningen av grundvattnet sker då huvudsakligen i ett vertikalt plan (Preene, 2012).

En akviklud har en så pass låg permeabilitet så att den utgör en barriär mot grundvattenflöde. Vanliga akvikluder är täta leror och berg. Vid pumpning av en sluten akvifer med en akviklud ovanför kan vattenflödet genom akvikluden anses försumbart. För att ett lager ska kunna benämnas som en akviklud i samband med en grundvattensänkning krävs förutom låg permeabilitet, två andra villkor (Preene, 2012):

- Lagrets utbredning ska täcka hela det område som påverkas av en grundvattensänkning. Vatten kan annars passera akvikluden och lagret kan därmed inte beskrivas som en barriär mot vattenflöde.
- Tillräcklig lagertjocklek. Akvikludens barriär mot flöde ökar med tjockleken.

En akvifug är till skillnad från ovan nämnda enheter, helt impermeabel och saknar därför vattenförande förmåga (Fetter, 2001). Tabell 2.3 sammanfattar de olika geologiska enheterna med typiska uppbyggnadsmaterial (Knutsson & Morfeldt, 2002).

Tabell 2.3 - Sammanfattning av de olika geologiska enheterna och typiska uppbyggnadsmaterial.

	Akvifer	Akvitard	Akviklud	Akvifug
Material	Sand eller grus	Siltavlagring eller finkornig morän	Tät lera och berg	Sprickfritt kristallint berg

2.4 Modeller för en styrd grundvattensänkning

För att kunna beräkna sättningar i ett påverkansområde är det nödvändigt att ha utfört en bedömning av områdets mark- och vattenförhållande. Denna information samlas i en geomodell vars innehåll beskrivs nedan. Avsnittet innehåller även en beskrivning av en avsänkningstratt som avgör storleken på påverkansområdet.

2.4.1 Geomodell

En geomodell är ett hjälpmedel vid dimensionering av ett bygg- eller anläggningsprojekt, där en förenklad modell över ett områdes mark- och vattenförhållande redovisas. Modellen består både av en geometrisk och en matematisk modell. Den geometriska modellen innehåller information om grundvatten samt jord- och bergarters utbredning, där materialens tjocklek och djup samt grundvattenytans nivå redovisas. Den matematiska modellen kompletterar den geometriska med beräkningsparametrar som är nödvändiga för att bland annat kunna utföra sättningsberäkningar (Möller, 2015a). En framtagen geomodell som återger en rimlig bild av verkligheten är en förutsättning för en lyckad dimensionering. En bra geomodell kräver tillräcklig mängd indata vilket innebär att modellen bör tas fram i ett tidigt skede och vid behov kunna kompletteras med fler utförda prover eller undersökningar. Vid projekt med en styrd grundvattensänkning bör geomodellen innehålla information om följande (Preene, 2012):

- Befintlig grundvattennivå eller portrycksprofil
- Förekomst av sättningsbenägen jord
- Förekomst av öppna och slutna akviferer, akvitarder och akvikluder samt deras permeabilitet, djup och tjocklek
- Förekomst av naturlig återinfiltration eller barriär mot grundvattenflöde
- Storleken på grundvattensänkningens påverkansområde

Preene (2012) anger permeabiliteten som en viktig men kritisk faktor då permeabiliteten är en svårbestämd parameter på grund av naturliga variationer i jorden och begränsande testmetoder. Geomodellen bör därför innehålla ett intervall av troliga värden för permeabiliteten som kan användas under beräkningar.

Grundvattenytans nivå fluktuerar under året. I Syd- och Mellansverige är nivån för grundvattnet ofta lägst under sensommar och tidig höst. Infiltrerad nederbörd tas under denna tid upp av vegetationen och når inte den underliggande grundvattenytan vilket resulterar i en låg grundvattennivå. Nivån är ofta som högst under sen höst och tidig vinter då höstens infiltrerade nederbörd når grundvattnet. Nivån är även hög efter perioden för snösmältning (Knutsson & Morfeldt, 2002). Den grundvattennivå som anges i en geomodell ska väljas med hänsyn till den naturliga årsvariationen av grundvattennivån. Byggnader inom påverkansområdet har tidigare genomgått marksättningar på grund av årsvariationen. Grundvattennivån i geomodellen ska därför väljas till den lägsta nivån under året (Preene, 2000).

2.4.2 Avsänkningstratt

En avsänkningstratt visar påverkansområdets utformning i profil. Den sänkta grundvattennivån framgår i modellen där den största avsänkningen sker vid den installerade brunnen. Den minsta avsänkningen sker vid den yttre gränsen av påverkansområdet. Utanför denna gräns sker ingen förändring av den befintliga grundvattennivån till följd av grundvattensänkningen. Storleken på avsänkningen är beroende av skillnaden mellan befintlig grundvattennivå och önskad grundläggningsnivå. Det är vanligt att grundvattnet sänks till en nivå cirka 0,5 till 1 meter under grundläggningsnivån. Avsänkningstrattens detaljutformning beror på flödet av grundvatten vilket påverkas av projektspecifika parametrar. Det finns ett flertal olika ekvationer för flöde av grundvatten. Flödet beräknas på olika sätt beroende på områdets geologiska enheter och det tekniska utförandet av grundvattensänkningen. Val av ekvation beror bland annat på om det är en öppen eller en sluten akvifer, om brunnen helt eller delvis genomtränger akviferen, samt om brunnarna är installerade längs en linje eller i en cirkel runt grundläggningen. Ekvationer för grundvattenflöde innehåller en faktor som beskriver den nya grundvattennivån, z_1 , en sträcka från brunnen. Då flödet är bestämt kan den nya grundvattennivån beräknas inom hela påverkansområdet och redovisas i en avsänkningstratt (Preene, 2012).

2.5 Marksättningar till följd av grundvattensänkningar

Nedan presenteras tre bidragande orsaker till sättningar av omkringliggande mark vid en styrd grundvattensänkning. Störst tyngd ligger på marksättningar till följd av en ökad effektivspänning. Till detta redovisas grundläggande ekvationer för sättningsberäkning.

2.5.1 Bristfällig grundvattenhantering och bortspolning av finkornig jord

För att undvika instabilitet av en utgrävning under grundvattenytan krävs en noggrann förundersökning som leder fram till en teknisk lösning som är väl anpassad till rådande förutsättningar. Bristande planering kan exempelvis leda till okontrollerat inläckage av vatten eller brott vid spontning, såsom hydraulisk bottenuppträckning. En bottenuppträckning leder till att jord strömmar in i utgrävningen vilket kan resultera i stora sättningar (Preene, 2012).

Vid grundvattensänkning i finkorniga jordar kan sättningar uppkomma om finkornig jord följer med grundvattenflödet och lämnar marken. Om förlusten av finkornig jord fortgår under en längre tid får jorden en lösare struktur och små kanaler till följd av erosionen kan bildas. Sättningar kan uppkomma på grund av att den lösare jorden komprimeras eller av att de bildade kanalerna

kollapsar. För att undvika dessa sättningar krävs ett pumpsystem som är anpassat för jordens struktur. Framförallt är det viktigt att ha filter i brunnen som kan hindra att fina korn i för hög grad pumpas upp från marken (Preene, 2012).

2.5.2 Sättningar till följd av ökad effektivspänning

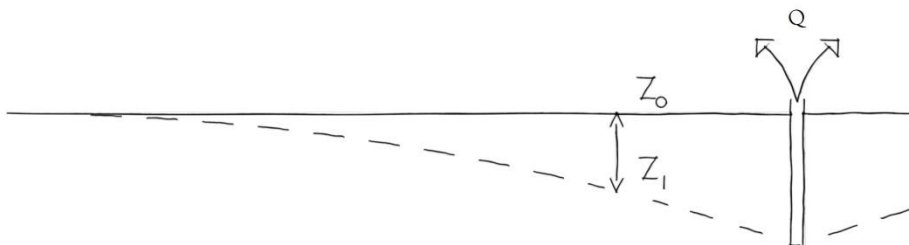
Nedan beskrivs hur effektivspänningen i en jord ökar vid en grundvattensänkning. Sättningar till följd av en ökad effektivspänning är främst förekommande i relativt komprimerbara jordar, exempelvis organiska jordar, lös silt och normalkonsoliderad lera (Powers, 1985). Fullt utvecklade sättningar i dessa jordar tar relativt lång tid. I Sverige förekommer främst lera i områden som efter den senaste istiden har legat under högsta kustlinjen. Exempel på områden som har legat under högsta kustlinjen är: Halland och längs med västkusten upp till norska gränsen, Blekinge och hela svenska östkusten samt ett område som sträcker sig från Bohuslän och upp till Mälardalen (Andersson, A. & Holmstrand, O. m.fl., 1984).

För att få ett pålitligt resultat vid beräkning av förväntad sättning krävs kännedom om den ökade effektivspänningen, varaktigheten för grundvattensänkningen och jordmassans permeabilitet. Ett felaktigt uppskattat värde för varaktigheten, exempelvis en för lång uppskattad varaktighet, ger en överskattad risk för sättning. Det kan ta flera år för en sättning att fullt utvecklas medan en styrd grundvattensänkning i vissa fall endast pågår i några månader (Powers, 1985).

En styrd grundvattensänkning medför ett flöde av grundvatten som får jorden under grundvattenytan att gå från ett hydrostatiskt till ett hydrodynamiskt tillstånd. Vid ett hydrodynamiskt tillstånd påverkas jordens korn och effektivspänning av grundvattnets flöde (Sällfors, 2009). Ekvationer för beräkning av sättning i detta avsnitt avser ett hydrostatiskt tillstånd och försummar därmed denna påverkan.

En sänkning av grundvattenytan ger ett minskat portryck och därmed en ökad effektivspänning. En grundvattensänkning kan därför liknas med en tilläggslast då de båda ger samma effekt. En tilläggslast ger en ökad effektivspänning på grund av en ökad totalspänning. En grundvattensänkning ökar istället den effektiva spänningen genom ett minskat portryck, se ekvation 2.2 (Preene, 2012). Förändringen i portrycket, Δu , är beroende av vattnets tunghet, γ_w och Δz , skillnaden mellan den ursprungliga grundvattennivån, z_0 och den nya nivån, z_1 (Preene, 2000). Figur 2.8 visar en principfigur över förändrad grundvattennivå. Förändring i portryck ges av,

$$\Delta u = \gamma_w \Delta z \quad (2.3)$$



Figur 2.8 – En principfigur över förändrad grundvattennivå, z_0 och z_1 visar skillnad mellan ursprunglig och ny grundvattennivå.

Varje avsänkt meter av grundvattnet under den befintliga grundvattennivån approximeras till att ge en ökad effektivspänning på 10 kPa (Sällfors, 2009). Den ökade effektivspänningen vid en grundvattensänkning leder till att marken komprimeras med påföljande marksättningar. Tre faktorer är särskilt avgörande för storleken på den resulterande sättningen. Faktorerna listas nedan (Preene, 2012),

- Förekomst och tjocklek av sättningsbenägen kohesionsjord under befintlig grundvattennivå. Sättningens storlek ökar vid lösare jordstruktur och ökad lagertjocklek.
- Resulterande avsänkingsnivå. Sättningen ökar med ökad grundvattensänkning.
- Totala tiden för grundvattensänkning. Längre pumptider ger generellt större sättningar.

Störst betydelse anses förekomsten av sättningsbenägen jord ha. Vid uttag av grundvatten sker en portrycksminskning i jorden. Genom tillämpning av jordmekanik och ett antagande om en elastisk deformation kan sättning till följd av en ökad effektivspänning beräknas. En elastisk deformation av en kohesionsjord innebär att förkonsolideringstrycket ej överskrids. Vid kännedom om ett lagrets tjocklek, h , förändrad effektivspänning, $\Delta\sigma'_v$ och kompressionsmodul, M , kan lagrets kompression i vertikalled, δ_v bestämmas genom (Preene, 2000),

$$\delta_v = h \frac{\Delta\sigma'_v}{M} \quad (2.4)$$

De flesta jordarter uppvisar en försumbar skillnad mellan mättad och omättad tunghet. Den vertikala totalspänningen kan därför antas oförändrad vid en grundvattensänkning. Då totalspänningen är oförändrad kan den ökade effektivspänningen i ekvation 2.4 likställas med det förändrade portrycket. Portrycket reduceras vid en grundvattensänkning och leder till ett positivt värde på komprimeringen genom (Preene, 2000),

$$\delta_v = h \frac{-\Delta u}{M} \quad (2.5)$$

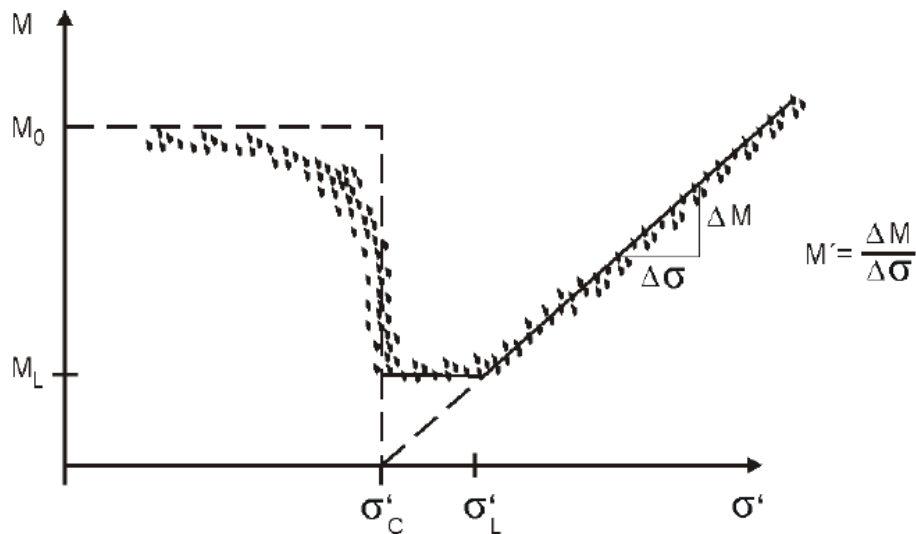
Portrycksförändringen kan uttryckas enligt ekvation 2.3, vattnets tunghet, γ_w , tillsammans med skillnad mellan planerade grundvattennivå och ursprunglig grundvattennivå, Δz , vilket ger ett alternativt uttryck för kompressionen (Preene, 2012),

$$\delta_v = h \frac{\gamma_w \Delta z}{M} \quad (2.6)$$

Sättning för olika jordarter

Enligt tidigare stycke 2.1.1 delas jord in i kohesionsjord och friktionsjord efter kornstorlek. Jord av ler eller silt benämns som kohesionsjord medan sand, grus och grövre jord benämns som friktionsjord. Vid sättningsberäkningar tillämpas kompressionsmodulen, M . Kompressionsmodulen i en kohesionsjord förändras vid ökad effektivspänning, σ' . Värdet på kompressionsmodulen för en kohesionsjord är beroende på tidigare belastning. Som tidigare nämnts, stycke 2.1.4, bestäms kompressionsmodulen genom att ett jordprov belastas vertikalt medan horisontella töjningar är förhindrade. Deformationsegenskapen för en kohesionsjord utvärderas genom ett odometerförsök där horisontella töjningar förhindras vid en vertikal belastning. Figur 2.9 visar ett principiellt resultat av kompressionsmodulens beroende av påförd spänning. Kompressionsmodulen, M_0 tillämpas fram till förkonsolideringstrycket, σ'_c . Vid spänningar över förkonsolideringstrycket är jorden normalkonsoliderad med kompressionsmodul

M_L . σ_L markerar en gräns där jorden blir deformationshårdnande vid en ökad belastning. Spänningar av den storleken är dock ovanliga (Trafikverket, 2014b).



Figur 2.9 - Kompressionsmodulens variation med spänningen (Trafikverket, 2014b).

I jämförelse med en kohesionsjord, är det svårt att utvärdera deformationsegenskapen för en friktionsjord genom provning. Ett empiriskt värde för friktionsjordar brukar därför tillämpas. I Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner (2014a) finns värden för olika friktionsjordars elasticitetsmoduler. I tabell 2.4 visas typiska värden på elasticitetsmodulen för jordarna grus, sand och morän. Materialets kompressionsmodul, M , kan uttryckas genom elasticitetsmodulen, E , och tvärkontraktionstalet, ν , enligt (Trafikverket, 2014b),

$$M = E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.7)$$

Enligt Trafikverket (2014b) kan tvärkontraktionstalet i ekvation 2.7 ansättas till 0,3 för en friktionsjord. M kan då förenklas till,

$$M \approx \frac{E}{0,74} \quad (2.8)$$

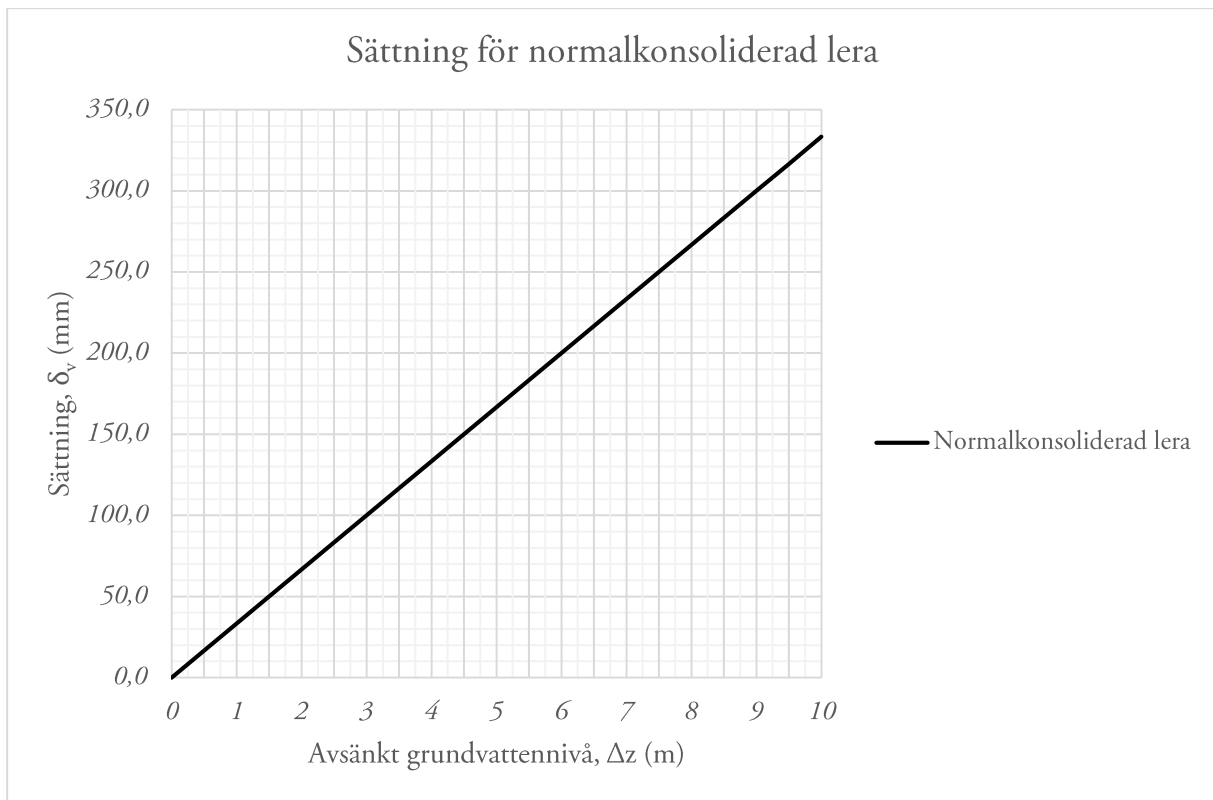
Omräknad elasticitetsmodul till kompressionsmodul för ovan nämnda jordarter redovisas i tabell 2.4. Tabellen innehåller även kompressionsmodulen för glacial lera, överkonsoliderad lera och normalkonsoliderad postglacial lera. De sistnämnda jordarternas värde är baserade på erfarenhet från tidigare ödometerförsök (Möller, 2016).

Tabell 2.4 – Elasticitetsmodul och kompressionsmodul för olika jordarter.

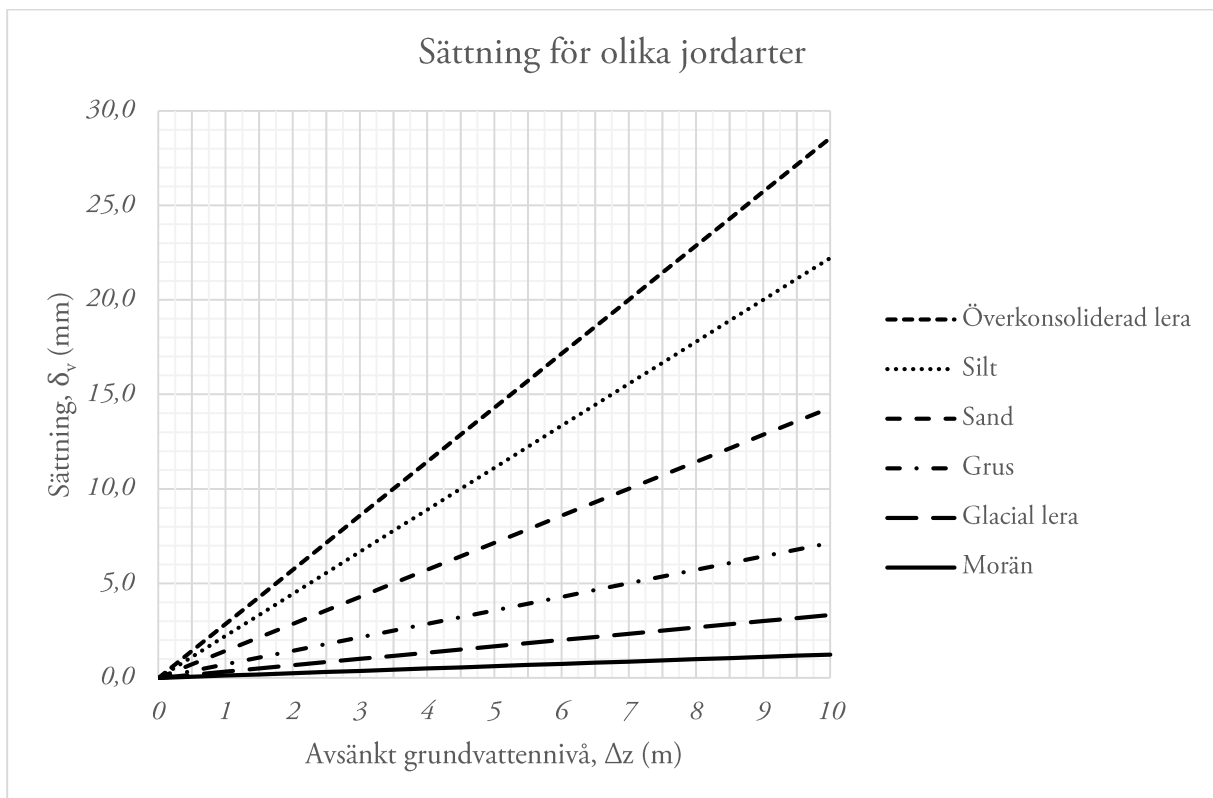
Jordart	Elasticitetsmodul, E (MPa)	Kompressionsmodul, M (MPa)
Morän	40 – 80	50 – 110
Glacial lera		30
Grus	10	14
Sand	5	7
Silt		4 – 5
Överkonsoliderad lera		3 – 4
Normalkonsoliderad postglacial lera		0,2 – 0,4

Morän har bildats under tiden av inlandsisar då både bitar av berg och lösare jord fördes med isen. Morän har ett stort intervall på ingående kornstorlek, från lerpartiklar till stora block. Moränen i Sverige består till stor del av sand och silt (SGU, 2016a). Den glaciala leran avsattes under inlandsisens avsmältning. Landhöjningen har gjort att områden med glacial lera, som tidigare legat under havsnivån, idag ligger ovanför havsnivån (SGU, 2016b). Överkonsoliderad lera innebär att spänningar under lerans förkonsolideringstryck förekommer och att kompressionsmodulen M_0 , enligt figur 2.9 tillämpas. Normalkonsoliderad lera är bildad under och efter senaste istiden. Spänningar större än förkonsolideringstrycket förekommer och kompressionsmodulen M_L , enligt figur 2.9 tillämpas (Trafikverket, 2014b).

Med hjälp av kompressionsmodulerna i tabell 2.4 och ekvation 2.6 kan sättning för de olika jordarterna i tabell 2.4 beräknas. Figurer 2.10 – 2.11 redovisar sättningens storlek för jordarterna vid ett minskat porttryck, exempelvis vid en grundvattensänkning. Grundvattensänkningar överstiger sällan 10 meter. Diagrammen i figuren redovisar därför en grundvattensänkning upp till 10 meter. Avsänkt grundvattennivå, Δz , ger sättningens storlek för en meters mäktighet av aktuell jordart. Den totala sättningen för ett jordlager beräknas genom att sättningens storlek enligt diagrammet i figuren multipliceras med jordlagrets totala mäktighet. Figur 2.10 redovisar sättningens storlek för en normalkonsoliderad postglacial lera och figur 2.11 redovisar sättningen för de resterande jordarterna i tabell 2.4. Den normalkonsoliderade postglaciala leran har en markant lägre kompressionsmodul och erhåller därmed en större sättning än för resterande jordarter. Figuren visar att storleken på sättning för kohesionsjordarna är beroende på konsolideringsgrad. Överkonsoliderad lera har tidigare belastats med en högre spänning och genomgår därför en mindre sättning än en normalkonsoliderad lera. Det framgår att grus och sand samt morän genomgår en mindre sättning än silt. Resultatet påvisar en större risk för sättningar när en grundvattensänkning sker vid förekomst av kohesionsjord.



Figur 2.10 - Sättning för normalkonsoliderad lera vid sänkt grundvattennivå upp till 10 meter.



Figur 2.11 - Sättning för olika jordarter vid sänkt grundvattennivå upp till 10 meter.

2.6 Sättningsprofil vid en grundvattensänkning

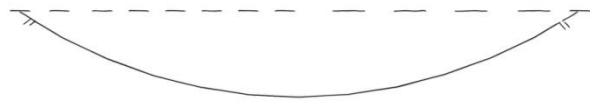
Profilen för markens sättning är beroende på avsänkningstrattens form. Avsänkningstrattens form är bland annat beroende av upphovet till sänkningen av grundvattnet. Nedan beskrivs två olika benämningar som används för att beskriva avsänkningstrattens form. Avsnittet beskriver även hur sättningsprofilen för en byggnad påverkas av underliggande mark och dess grundläggning.

2.6.1 Hogging och sagging

Profilen för avsänkningstratten vid en styrd grundvattensänkning bildar en uppåt konvex form, se figur 2.8. På engelska benämns denna form *hogging*. Motsatt profil, en nedåt konvex form, benämns *sagging* (Preene, 2012). Figur 2.12 och 2.13 visar en principiell sättningsprofil vid hogging respektive sagging. Den övre horisontella och streckade linjen markerar den ursprungliga marknivån. Den nedre, heldragna linjen markerar den nya marknivån. Vid en styrd grundvattensänkning förekommer endast formen hogging. Vid exempelvis en byggnation av en bergtunnel kan profilen för avsänkningstratten både ha formen hogging och sagging. Sagging förekommer ovanför tunneln och hogging i de yttre områdena av påverkansområdet.



Figur 2.12 – Principiell sättningsprofil vid hogging. Övre streckad linje markerar ursprunglig marknivå.

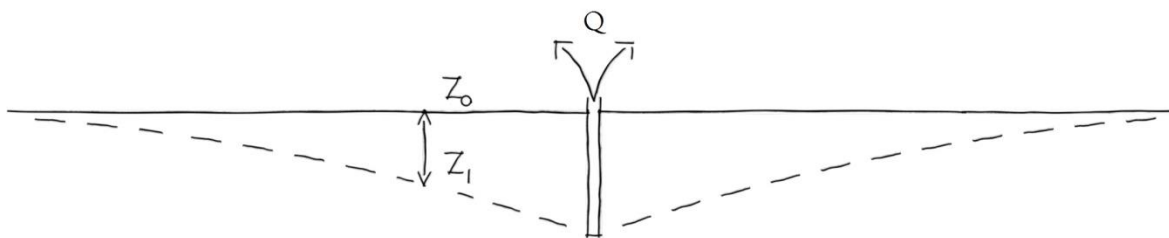


Figur 2.13 – Principiell sättningsprofil vid sagging. Övre streckad linje markerar ursprunglig marknivå.

En marksättning som bildar en hoggingprofil ger upphov till större följdskador på byggnader i jämförelse med påverkan av en saggingprofil. Följdskador vid en hogging- respektive saggingprofil har Burland och Wroth (1974) beskrivit genom en jämförelse av dess påverkan på en byggnad med fasad av tegel eller murverk. Oarmerat tegel eller murverk uppvisar sprickor vid kritiska dragspänningar. I en byggnad vars deformation karakteriseras av en saggingprofil uppkommer dragspänningar i byggnadens nedre del. Byggnadens underliggande fundament kommer att motverka dessa dragspänningar vilket minskar uppkomst och spridning av sprickor. Om deformationsprofilen istället uppvisar en hoggingprofil uppstår dragspänningar i byggnadens topp. I motsats till deformationen med en saggingprofil finns det inget i byggnadens topp som hindrar spridning av sprickor till den nedre delen. Om genomgående sprickor uppstår kan dessa leda till att byggnaden fortsätter att deformeras som två eller flera enskilda enheter.

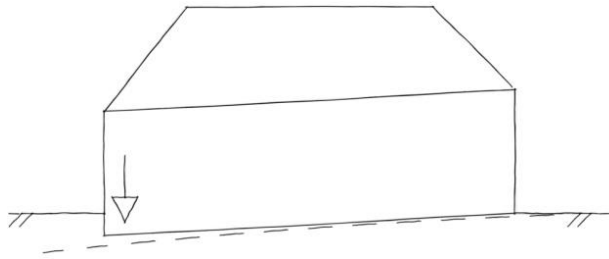
2.6.2 Sättningsprofil utifrån mark och grundläggning

I en likformig jord ger en styrd grundvattensänkning en avsänkingsprofil där sänkningen avtar med avståndet från pumpningens centrum, se figur 2.14.

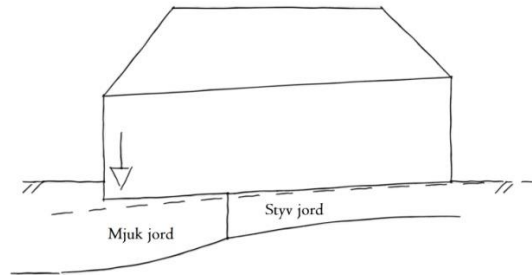


Figur 2.14 - Principiell figur som visar att avsänkningen, skillnad mellan ny och ursprunglig grundvattennivå, avtar med avståndet från uttagsbrunnen.

Då grundvattensänkningen avtar minskar även sättningens storlek med avståndet. Den avtagande sättningprofilen vid en grundvattensänkning ger därför upphov till differenssättningar i påverkansområdet. Figur 2.15 visar principen för en likformig jord där den avtagande avsänkingsprofilen ger upphov till en sättningsskillnad mellan en byggnads motstående sidor. Om underliggande jord ej är likformig och en styvhetskillnad finns mellan materialen, kan detta bidra till en ökad sättningsskillnad. Exempel på detta visas i figur 2.16 där en byggnad är delvis grundlagd på en mjuk jord och delvis på en styvare jord. Mjuk och styv jord kan vara lera respektive grus (Preene, 2012).

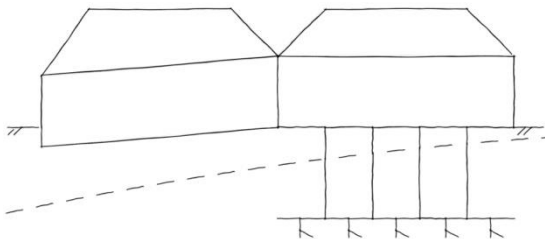


Figur 2.15 – Figuren visar en byggnad som påverkas av en sättningsskillnad. I en likformig jord ger en grundvattensänkning upphov till en avtagande sättningsskillnad.



Figur 2.16 – Figuren visar en byggnad som påverkas av en sättningsskillnad. Olika styvheter i underliggande jord kan bidra till en ökad sättningsskillnad.

Om en byggnads grundläggning har olika styvheter kan även detta bidra till en ökad sättningsskillnad. Figur 2.17 visar en byggnad som är delvis grundlagd med fundament och delvis med spetsburna pålar, vilket kan ge en styvhetsdifferens mellan grundläggningarna. Delen med lägre styvhet kommer att genomgå en större sättning vid en grundvattensänkning (Preene, 2012). Stora skador kan uppkomma vid gränsen för de olika grundläggningarna (Knutsson & Morfeldt, 2002).



Figur 2.17 - Figuren visar en byggnad delvis grundlagd med fundament och delvis grundlagd med spetsburna pålar. Olika grundläggningstyper kan bidra till en ökad sättningsskillnad och uppkomst av skador.

3 Riskklassificering idag

Följande kapitel beskriver riskklassificering av byggnader i dagens läge. Gränsvärden för sättning presenteras och kopplas till skador på en byggnad. Vidare beskrivs riskklassificering av byggnader i samband med andra typer av arbeten. Kapitlet avslutas med en beskrivning av ett antal faktorer som anses påverka omfattningen av eventuella skador på byggnader vid en differenssättning.

3.1 Riskklassificering av byggnader vid styrd grundvattensänkning

Detta avsnitt beskriver hur riskklassificeringar idag kan brista i omfattning och varför det är komplicerat att ta fram en standardiserad riskklassificering för byggnader som påverkas av en styrd grundvattensänkning. Ett exempel på en utförd riskklassificering presenteras. Typiska skador på byggnader redovisas samt gränsvärden som kan kopplas till troliga skador på en byggnad. Avsnittet avslutas med ett förslag på en riskklassificering där påverkansområdet delas in i riskzoner utifrån storleken på förväntade marksättningar.

3.1.1 Brister i förundersökningar idag

I dagens läge är förundersökningar av ett påverkansområde ofta bristande i omfattning. En förundersökning behandlar sällan alla byggnader som kan påverkas av en grundvattensänkning. Om tillståndet på en byggnad inte har dokumenterats före projektet blir det svårt att bedöma ägarens rätt till ersättning vid händelse av en skada på byggnaden. Att förundersökningar brister med ett för litet undersökningsområde gör även att få fallstudier finns att tillgå med tillräcklig information för att kunna utvärdera skador till följd av en grundvattensänkning (Preene, 2000).

Vid tunnelbyggande finns det metoder för att kunna bedöma sättningens utbredning och accepterade sättningsnivåer för omkringliggande byggnader. Vid byggnation av en tunnel sker marksättningar relativt lokalt ovanför arbetsplatsen. Så är inte fallet vid en styrd grundvattensänkning, där sättningsskador kan påträffas hundratals meter från pumpningsplatsen. Då sättningens utbredning är olika vid tunnelarbete respektive vid en styrd grundvattensänkning är det nödvändigt att enskilt studera effekterna vid en styrd grundvattensänkning. En studie som innehåller information om accepterade sättningsnivåer kan vara ett hjälpmedel vid identifiering av byggnader med risk för sättningsskada och påföljande riskklassificering (Preene, 2000). Att förutse marksättningar till följd av närliggande konstruktionsarbete är komplicerat då det är svårt att uppskatta alla faktorer som påverkar. Svårbestämda parametrar såsom exempelvis områdets geologi eller teknik som används vid grundvattensänkningen leder till att en teoretisk analys blir komplicerad. Även yrkesskicklighet inom arbetsplatsen är en svår parameter att förutse som bland annat påverkar överensstämmandet mellan beräknad sättning och resulterande sättning. Ett sätt att kringgå problemet är att ta hjälp av observationer och erfarenheter från tidigare projekt i bedömning av storlek på förväntade sättningar (D'Appolonia, 1971).

3.1.2 Utförd förundersökning

År 2015 utfördes en förstudie med en riskklassificering av byggnader för en planerad byggnation av en järnvägstunnel i sydvästra Sverige. Järnvägstunnelns sträckning innefattar både byggnation i berg och tråg. Vid byggnation med tråg krävs en styrd grundvattensänkning. Förstudien innefattade därför en riskklassificering av omkringliggande byggnader. Utifrån ett bestämt påverkansområde, från grundvattensänkningen, uppmärksammades samtliga byggnader som omfattades av en grundvattensänkning på minst en meter. En meters avsänkning valdes då grundvattennivån antogs variera med cirka en meter under året. Den styrda grundvattensänkningen förutsågs därför ge marksättningar när sänkningen översteg en meter. Skador på byggnader antogs kunna orsakas av

grundvattensänkning, närhet till stödkonstruktioner och vibrationer. En byggnad utan befintliga sättningsskador bedömdes få skador om en lutning 1/500 uppkom inom byggnaden. Förekomst av överkonsoliderad mark togs med i bedömningen av förväntad sättning. Överkonsoliderad mark genomgår större sättningar först när den effektiva spänningen har uppnått eller passerat förkonsolideringstrycket. Beroende på vilken effektivspänning som jorden tidigare hade utsatts för, kunde en säker avsänkning bestämmas. Exempelvis bedömdes att en 20 kPa överkonsoliderad lera fick en oacceptabel sättning vid en grundvattensänkning som översteg 2 meter. Vid utredningen togs inte hänsyn till den specifika profilen på avsänkningstratten. Allt grundvatten under den befintliga grundvattenytan antogs försvinna inom påverkansområdet. Detta antagande är en förenkling av verkligheten som kan överskatta minskningen av portrycket och därmed storleken på den resulterande sättningen. Att överskatta sättningens storlek ger en bedömning på säkra sidan. En alltför grov överskattning kan dock leda till negativa följder i den fortsatta byggprocessen, exempelvis vid kostnadsbedömning (Möller, 2015b).

3.1.3 Bedömning av skador utifrån sprickor och töjning

Boscardin och Cording (1989) presenterar en tabell för bedömning av skadegrad utifrån storleken på en spricka. Det observeras att det är viktigt att beakta var sprickan har uppkommit på byggnaden för att kunna bedöma sprickans påverkan. Klassificeringen gäller främst murverksbyggnader och bör inte användas vid skadebedömning av moderna, armerade byggnader. Preene (2000) kommenterar vidare att värdena i tabellen endast bör användas för byggnader som inte är särskilt känsliga beroende på ålder eller användningsområde. Leca och New (2006) klassificerar skador på byggnader utifrån tre olika skadegrupper;

- *Estetiska*, skador som påverkar utseendet av byggnaden
- *Funktionella*, skador som påverkar byggnadens funktion
- *Strukturella*, skador som påverkar den bärande förmågan i byggnaden

Dessa skadegrupper inkluderar Leca och New i Boscardin och Cordings klassificering, resultatet presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1 – Skadegrad och beskrivning av skada utifrån sprickbredd.

Skadegrad	Sprickbredd	Beskrivning av skada
0	< 0,1 mm	Mikrosprickor
1	< 1 mm	Estetisk
2	< 5 mm	Estetisk
3	5 – 15 mm, eller flera sprickor >3 mm	Funktionell
4	15 – 25 mm, beror också på antalet sprickor	Strukturell
5	> 25 mm, beror också på antalet sprickor	Strukturell

Ovanstående tabell förutsätter att en skada har uppstått för att dess följder ska kunna utvärderas. Sprickor uppkommer när den kritiska töjningen överskrider i ett material. Kritiska töjningen i en standardbyggnad kan kopplas till samma skadegrader som beskrivs i tabell 3.1. Sambandet mellan kritiska töjningar och skadegrad redovisas i tabell 3.2 (Leca & New, 2006).

Tabell 3.2 - Samband mellan kritisk töjning och skadegrad.

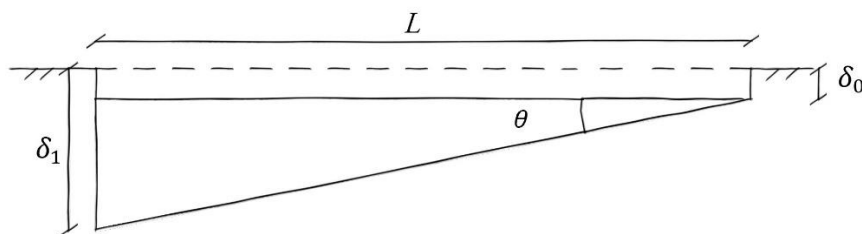
Skadegrad	Töjning, ε (%)
0	< 0,050
1	0,050 – 0,075
2	0,075 – 0,150
3	0,150 – 0,300
4, 5	> 0,300

Det är svårt att i praktiken uppskatta den kritiska töjningen. Studier har visat en korrelation mellan en byggnads töjning och dess lutning vid en differenssättning. En lutning är i praktiken mer fördelaktig att uppskatta inför ett byggprojekt. Det är inte troligt att ett unikt gränsvärde för maximal lutning gäller för samtliga murverkskonstruktioner för att de inte ska uppnå en kritisk töjning. För de flesta byggnader anses dock 2 ‰ vara en acceptabel lutning (Leca & New, 2006).

3.1.4 Bedömning av maximal sättning och lutning

En horisontell sättningsprofil under en byggnad ger inga följdskador då sättningen är lika stor under hela byggnaden. Det är ojämna sättningar över en byggnads längd som ger upphov till skador. I tabell 3.3 presenteras en riskkategorisering av byggnader som redovisar skadegrad utifrån ojämna sättningar. En ojämna sättning benämns som en differenssättning då en sättningsdifferens uppkommer mellan två stycken punkter. I tabell 3.3 förväntas en differenssättning ske mellan en byggnads två motstående sidor, se figur 3.1 (Preene, 2012). Lutningen¹, θ , utgör ett förhållande mellan sättningsdifferensen, $\delta_1 - \delta_0$, och avståndet till motstående sida, L , det vill säga,

$$\theta = \frac{\delta_1 - \delta_0}{L} \quad (3.1)$$



Figur 3.1 – Principfigur över förhållandet mellan sättningsdifferens och avståndet mellan två punkter. I tabell 3.3 utgör avståndet mellan punkterna byggnadens längd.

Då det saknas en önskvärd mängd fältstudier av styrda grundvattensänkningar och eventuella skador utgår värden för riskkategorisering i tabell 3.3 från tidigare utredningar av sättningssskador inducerade av grundvattensänkning i samband med tunnelbyggande. I brist på värden anpassade för en styrd grundvattensänkning kan dessa värden vara en grund för en riskklassificering. Riskkategoriseringen enligt tabell 3.3 är främst anpassad för bostadshus och mindre industrier och bör därför inte tillämpas för byggnader som anses känsliga på grund av byggnadskonstruktion, ålder eller användningsområde. Tabellen presenterar riskkategorier utifrån gränsvärden för maximal sättning, lutning samt förväntad omfattning av skador (Preene, 2000).

¹ $\tan(\theta) = \frac{\delta_1 - \delta_0}{L}$. För små vinklar approximeras $\tan(\theta) \approx \theta$

Tabell 3.3 - Riskkategori utifrån gränsvärden för maximal sättning, lutning samt förväntad omfattning av skada.

Riskkategori	Maximal sättning	Lutning	Förväntad omfattning av skada
Försumbar	< 10 mm	< 1/500	Osannolikt att ytlig skada uppstår
Lindrig	10 – 50 mm	1/500 – 1/200	Troligt att ytlig skada uppstår, osannolikt med strukturell skada
Måttlig	50 – 75 mm	1/200 – 1/50	Ytlig skada förväntad och troligt med strukturell skada.
Allvarlig	75 mm	>1/50	Strukturell skada förväntad

Tabellen redovisar maximal sättning och lutning som kan ge upphov till skador. Ingen entydig längd kan härledas utifrån värden för maximal sättning och lutning i tabellen. Vid en riskbedömning bör både maximal sättning och lutning studeras. Se avsnitt 3.1.5 för ett exempel på hur värden för maximal sättning kan tillämpas i en riskklassificering. I tabellen kan utläsas att en byggnad med en sättning eller lutning mindre än 10 mm respektive 1/500 får en försumbar påverkan. En lutning 1/500, 2 ‰ överensstämmer med enligt Leca och New (2006) accepterade lutningsvärde för de flesta byggnader.

Tabell 3.4 är hämtad från Powers (1985) och beskriver gränsvärden för lutning kopplade till omfattning av skador på en byggnad. Lutningen uppkommer till följd av en differenssättning. Vid uppskattning av differenssättningen ska både befintlig och nytillkommen sättning beaktas. Byggnadens lutning ges genom förhållandet av differenssättning och avståndet mellan två punkter inom en byggnad. Lutning 1/100 och 1/800 är yttre gränsvärden. 1/100 anses ge omfattande skador medan 1/800 en försumbar påverkan.

Tabell 3.4 - Gränsvärde för lutning kopplade till omfattning av troliga skador.

Gränsvärden lutning	Omfattning av troliga skador
1/800	Generellt försumbar påverkan
1/750	Påverkan på maskiner som är känsliga för sättningar
1/500	Säker gräns för byggnader där sprickor ej är tillåtet
1/300	Förväntade sprickor i träväggar
1/250	Synlig lutning av höga, styva byggnader
1/150	Förväntad strukturell skada. Omfattande sprickor i väggar av trä och tegel
1/100	Omfattande skador

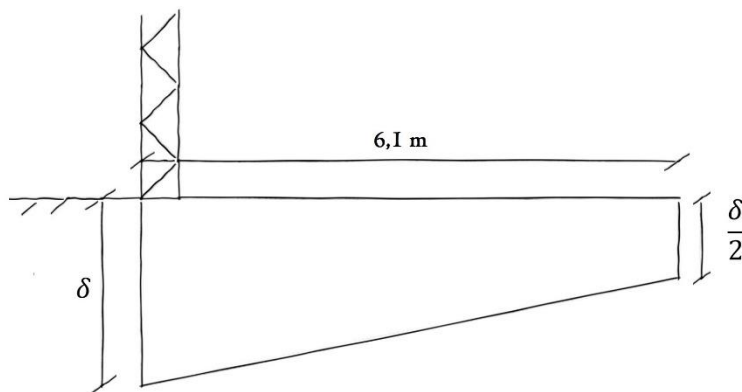
Tabell 3.4 är främst baserad på observationer av byggnader med stomme av stål eller armerad betong. De observerade byggnaderna har genomgått sättningar orsakade av egentyngd. I jämförelse med sättning som orsakas av yttre faktorer kan ofta större marksättningar ske vid en sättning orsakad av egentyngd, utan uppkomst av omfattande skador. Sättningar som orsakas av yttre faktorer ger ofta upphov till differenssättningar och utvecklas snabbare (Powers, 1985). Tabell 3.3 och 3.4 har liknande gränsvärden för lutning, exempelvis utgör en lutning 1/500 en gräns för att undvika estetiska skador. Tabell 3.3 tar dock inte hänsyn till befintliga sättningar i bedömningen.

Stommateriel

I tabell 3.5 redovisas maximal sättning, δ , för byggnader utifrån stommateriel. Värdena anger gränser för att undvika estetiska och funktionella skador på en byggnad, exempelvis sprickor eller svåröppnade fönster och dörrar. Dessa typer av skador inträffar före strukturella skador (Powers, 1985). Värdena på maximal sättning beror på hur sättningen fördelas över byggnadens längd. Värdena i tabell 3.5 är anpassade till en sättningsprofil där den maximala sättningen sker under en byggnads ytterkant och halveras över en sträcka på cirka 6,1 meter (20 fot), se figur 3.2. Differenssättningen kan approximeras till en lutning av byggnaden. Approximerade lutningar är mellan 1,6 och 4,2 ‰, se tabell 3.5. Värdena i tabellen är endast en rekommendation och bör anpassas till rådande förutsättningar. Exempelvis kan en större sättning accepteras om en jämnare sättningsprofil förekommer än den enligt figur 3.2. Ett lägre accepterat värde på sättningen kan vara aktuellt vid en differenssättning som ger upphov till en större lutning än enligt figur 3.2 (D'Appolonia, 1971).

Tabell 3.5 – Maximal sättning och lutning för olika stommateriel.

Stommateriel	Maximal sättning, δ (mm)	Approximativ lutning (‰)
Armerad betong, stål, tegel	51	4,2
Sten	25	2,1
Blockelement av betong	19	1,6



Figur 3.2 – Illustrerar hur maximal sättning i tabell 3.5 och enligt D'Appolonia (1971) tillämpas.

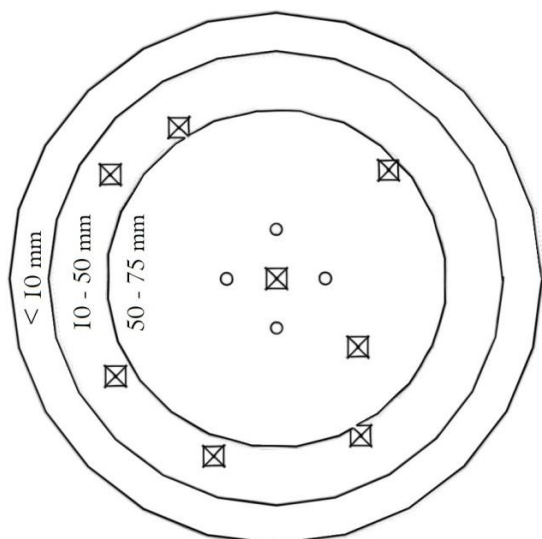
3.1.5 Riskzoner

Enligt Preene (2000) kan ett påverkansområde delas in i riskzoner utifrån storlek på förväntade sättningar. Riskzonerna definieras av ett sättningsintervall för maximal sättning enligt tabell 3.3. Riskzoner kan vara ett hjälpmedel för att riskklassificera byggnader som påverkas av en grundvattensänkning.

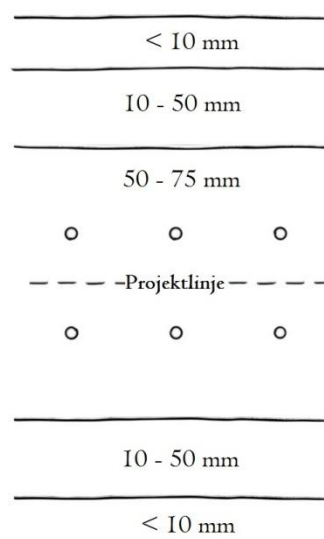
Vid antagande om en homogen geomodell avtar sättningens storlek med avståndet från uttagsplatsen. Riskzonen närmast brunnen har då störst sättningsvärde. Zonen med störst avstånd från brunnen kan definiera en gräns där sättningen ger en försumbar påverkan på omkringliggande byggnader. Storlek och form på riskzonerna påverkas av utbredningen av grundvattensänkning som i sin tur påverkas av flödesriktningen till de installerade brunnarna. Cirkulära riskzoner uppstår vid en cirkulär formation av brunnar, se avsnitt 2.2 och figur 2.5. Omkretsen för riskzoner ökar

med avståndet från brunnen (Preene, 2012). Figur 3.3 visar ett exempel på hur ett påverkansområde kan delas upp i cirkulära riskzoner. Byggnader inom området är markerade med kryss och kan delas in i riskkategorier utifrån vilken riskzon de är placerade inom. Riskkategori och förväntad omfattning av skada kan utläsas i tabell 3.3. Byggnaden i centrum av figuren och påverkansområdet är det projekt som medför att grundvattnet sänks. De fyra mindre ringarna runt byggnaden illustrerar brunnar för uttag av grundvatten. Är ett flertal brunnar arrangerade på en linje, uppstår ett flöde som är vinkelrätt mot brunnslinjen, se avsnitt 2.2 och figur 2.4. Riskzonerna formas då av linjer som är parallella med brunnslinjen, se figur 3.4. Installerade brunnar illustreras med sex stycken ringar parallellt med projektlinjen.

Ovan beskrivna former på riskzoner gäller endast vid ett antagande om en homogen geomodell där jordmaterialet och befintlig grundvattennivå inte förändras med avståndet från uttagsplatsen. Detta kan vara en inledande förenkling för att skapa riskzoner. Zonerna kan senare förfinas och förhoppningsvis minskas om avvikelser beaktas i geomodellen. Exempelvis minskas formen på riskzonerna om hänsyn tas till förekomst av mindre komprimerbar jord, såsom grov friktionsjord inom området (Preene, 2012).



Figur 3.3 - Exempel på cirkulära riskzoner vid en cirkulär formation av brunnar. Byggnader inom riskzonerna är markerade med kryss. Byggnaden i centrum av figur och påverkansområde är det projekt som medför en grundvattensänkning. De fyra mindre cirkelarna runt byggprojektet markerar installerade brunnar.



Figur 3.4 - Exempel på riskzoner vid en rak formation av brunnar. Brunnarna illustreras med ringar parallellt med projektlinjen.

Byggnader som är placerade inom riskzonerna *måttlig* och *allvarlig*, se tabell 3.3, rekommenderas att inventeras och bedömas utefter befintligt skick innan en grundvattensänkning utförs. Även byggnader som anses känsliga inom riskzonen *lindrig* rekommenderas att ingå i en sådan inventering. För att undvika att skador ska uppstå på närliggande byggnader kan det vara aktuellt med förebyggande åtgärder. Kostnaden för en åtgärd kan ibland bli högre än kostnaden för reparation av en skada. Ett mer ekonomiskt alternativ till en förebyggande åtgärd kan därför vara att reparera eventuell skada i efterhand (D'Appolonia, 1971).

3.2 Bedömning av byggnader enligt dagens standarder

För bedömning av hur byggnader påverkas vid arbeten som genererar vibrationer och stötar finns idag två stycken gällande standarder. Uppkomstskällan till vibrationerna och stötarna skiljer mellan de olika standarderna. En standard gäller för sprängningsinducerade vibrationer (Swedish Standard Institute, 2011) och en standard gäller för vibrationer i byggnader orsakade av markarbeten såsom pålning, schaktning, spontning och packning (Standardiseringen i Sverige, 1999). Båda standarderna beskriver bland annat en metodik för beräkning av ett riktvärde för vertikal svängningshastighet för berörda byggnader. Innehållet i standarderna har grundats på tidigare erfarenheter av samband mellan uppkommen skada och vertikal svängningshastighet. I båda standarderna beskrivs en metod för riskanalys där riktvärdet är ett rekommenderat gränsvärde. Det poängteras att gränsvärdet bör anpassas efter projektspecifika förhållanden. Riktvärdet är uttryckt som en funktion av faktorer som påverkar en byggnads kapacitet att klara av vibrationer utan att erhålla skador. Nedan presenteras hur riktvärdena beräknas inom standarderna.

3.2.1 Standard för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader

Riktvärde för tillåten vertikal svängningshastighet (mm/s), v_1 , beräknas utifrån en okorrigerad svängningshastighet, v_0 , tillsammans med korrigeringsfaktorer för typ av byggnad, F_b , byggnadsmaterial, F_m , avstånd, F_d , och verksamhet, F_t , se tabell 3.6 – 3.9. Riktvärdet beräknas enligt

$$v_1 = v_0 F_b F_m F_d F_t \quad (3.1)$$

Värdet på en okorrigerad svängningshastighet, v_0 , är beroende på undergrunden, se tabell 3.6:

Tabell 3.6 - Okorrigerad vertikal svängningshastighet vid olika undergrunder.

Undergrund	Vertikal svängningshastighet (mm/s)
Löst lagrad morän, sand, grus, lera	18
Fast lagrad morän, skiffer, mjuk kalksten	35
Granit, gnejs, hård kalksten, kvartsitisk sandsten, diabas	70

Byggnadsfaktor, F_b

Byggnader är indelade i fem stycken klasser beroende på vibrationskänslighet, se tabell 3.7:

Tabell 3.7 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av byggnad.

Klass	Byggnad	Byggnadsfaktor F_b
1	Tunga konstruktioner såsom broar, kajer, försvarsanläggningar och liknande	1,70
2	Industri- och kontorsbyggnader av huvudsakligen prefabricerade element	1,20
3	Normala bostadsbyggnader	1,00
4	Speciellt känsliga byggnader och byggnader med höga valv eller konstruktioner med stora spännvidder	0,65
5	Riktvärden för särskilt känsliga kulturhistoriska byggnader, anläggningar och miljöer som identifierats i utredningen bestäms separat	$\leq 0,5$

Materialfaktor, F_m

Byggnadsmaterial är indelade i fyra stycken klasser beroende på vibrationskänslighet, se tabell 3.8:

Tabell 3.8 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av byggnadsmaterial.

Klass	Material	Materialfaktor F_m
1	Armerad betong, stål, trä	1,20
2	Oarmerad betong, tegel, betonghålstén, lättklinkerbetong	1,00
3	Autoklaverad lättbetong, revetering, puts, gipsstuckatur m.m.	0,75
4	Kalksandsten (mexitegel), kakelugn med känsliga fogar	0,65

Avståndsfaktor, F_d

Det kortaste avståndet mellan en sprängsalva och en byggnad ger en avståndsfaktor. Faktorn utläses ur ett diagram där avståndet och markförhållande ger en avståndsfaktor. Detta diagram är dock inte inkluderat i denna rapport. Markförhållanden som kan utläsas är lera, morän och berg. Det framgår att lera är den undergrund som ger lägst värde på korrigeringsfaktorn, berg medför den högsta faktorn och den högsta toleransen.

Verksamhetsfaktor, F_t

En verksamhetsfaktor beror på hur lång tid sprängningsarbeten ska utföras, se tabell 3.9:

Tabell 3.9 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av verksamhet.

Klass	Verksamhetsfaktor
För tunnlar, berggrum, vägskärningar, grundläggningsarbeten och liknande anläggningsprojekt	1,0
För fasta anläggningar såsom bergtäkter och gruvor	1,0 – 0,75

3.2.2 Standard för vibrationer i byggnader i samband med markarbeten

Riktvärde för tillåten vertikal svängningshastighet (mm/s), v_1 , beräknas utifrån en okorrigerad svängningshastighet, v_0 , tillsammans med korrigeringsfaktorer för typ av byggnad, F_b , byggnadsmaterial, F_m , och grundkonstruktion, F_g , se tabell 3.10 – 3.13. Riktvärdet beräknas enligt

$$v_1 = v_0 F_b F_m F_g \quad (3.2)$$

Värdet på en okorrigerad svängningshastighet, v_0 , är beroende på undergrund och typ av arbete som utförs, se tabell 3.10:

Tabell 3.10 – Okorrigerad vertikal svängningshastighet beroende på undergrund och typ av arbete.

Undergrund	Pålning, spontning eller schaktning (mm/s)	Packning (mm/s)
Lera, silt, sand eller grus	9	6
Morän	12	9
Berg	15	12

Byggnadsfaktor, F_b

Byggnader är indelade i fem stycken klasser beroende på vibrationskänslighet, se tabell 3.11:

Tabell 3.11 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av byggnad.

Klass	Typ av konstruktion	Byggnadsfaktor, F_b
1	Tunga konstruktioner såsom broar, kajer, försvarsanläggningar o.d.	1,70
2	Industri- och kontorsbyggnader	1,20
3	Normala bostadsbyggnader	1,00
4	Speciellt känsliga byggnader och byggnader med höga valv eller konstruktioner med stora spännvidder, t.ex. kyrkor och muséer	0,65
5	Historiska byggnader i ömtåligt skick samt vissa känsliga ruiner	0,50

Materialfaktor, F_m

Byggnadsmaterial är indelade i fyra stycken klasser beroende på vibrationskänslighet, se tabell 3.12:

Tabell 3.12 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av byggnadsmaterial.

Klass	Typ av byggnadsmaterial	Materialfaktor, F_m
1	Armerad betong, stål, trä	1,20
2	Oarmerad betong, tegel, betonghålsten, lättklinkerbetong	1,00
3	Autoklaverad lättbetong, reveterad fasad	0,75
4	Kalksandsten	0,65

Grundkonstruktion F_g

För grundkonstruktion i lera, silt, sand eller grus bestäms en grundkonstruktionsfaktor enligt tabell 3.13. Faktorn sätts till 1,0 för en grundkonstruktion i ett fastare material, såsom morän.

Tabell 3.13 – Korrigeringsfaktor beroende på typ av grundkonstruktion.

Klass	Typ av grundkonstruktion	Grundkonstruktionsfaktor, F_g
1	Plattor	0,6
2	Mantelburna pålar	0,8
3	Spetsburna pålar	1,0

3.2.3 Slutsatser av gällande standarder

Det finns likheter mellan standarderna, i båda beräknas ett riktvärde utifrån en okorrigerad svängningshastighet tillsammans med korrigeringsfaktorer. I båda standarderna tillämpas en korrigeringsfaktor för en byggnads markförhållande där undergrunden förenklat kan delas in i lera, morän eller berg. Lera anses vara mest känslig medan berg bidrar till den största toleransen mot vibrationer. I standarden för sprängningsarbeten bestäms en avståndsfaktor utifrån bland annat typ av mark där lera anses vara mest känslig följt av morän och berg. Även i bedömningen av grundkonstruktion beskrivs att en undergrund av lera, silt, sand eller grus ger en lägre korrigeringsfaktor än en undergrund av ett fastare material. Korrigeringsvärden för typ av byggnad och byggnadsmaterial är lika stora i båda standarderna. Byggnadsmaterial av armerad betong, stål och trä har det högsta värdet på materialfaktor och anses därför ha högst tolerans mot vibrationer. Material såsom oarmerad betong och tegel har en större känslighet för vibrationer. Standarden för

vibrationer i samband med markarbeten innehåller en bedömning av grundkonstruktion där plattor bedöms ha lägst kapacitet och mantelburna pålar en lägre kapacitet än spetsburna pålar.

3.3 Faktorer med inverkan på omfattning av eventuell skada

I detta avsnitt beskrivs ett antal faktorer som är av betydelse för en byggnads kapacitet att undvika skador vid sättningsdifferenser. Faktorerna är längd, grundläggning och stommateriell samt befintligt skick och inverkan av marksättnings hastighet.

3.3.1 Byggnadens längd, grundläggning och stommateriell

Byggnadens längd är en faktor som har en stor påverkan på eventuella skador vid en styrd grundvattensänkning. En längre byggnad påverkas i större grad negativt än en kortare byggnad. En hoggingprofil ger upphov till en sättningsdifferens över byggnadens längd. En längre byggnad får en större sättningsdifferens mellan dess motstående sidor, i jämförelse med en kortare byggnad. En längre byggnad behöver i större grad krökas för att följa den ojämna deformationen (Leca & New 2006).

En grundläggnings känslighet för sättningsdifferenser ökar med minskad styvhet i grundläggningen. En byggnad som är grundlagd med pålar eller med en armerad grundplatta genomgår en mindre differenssättning än en byggnad som är grundlagd med fundament. Den grundläggning som kan anses vara mest känslig för en differenssättning är enskilda, ytligt grundlagda fundament. Mantelburna pålar kan vid en grundvattensänkning utsättas för en nedåtdragande effekt som i sin tur kan leda till en differenssättning. Strukturella skador på grund av denna effekt är dock ovanliga. Anslutna tillbehör till en pålad huvudbyggnad, som inte är grundlagda med pålar, påverkas i relation till byggnaden i större grad av marksättningen. Exempel på sådana tillbehör kan vara anslutna väggar till byggnaden, trappor, eller markbeläggning (Powers, 1985).

Olika typer av stommateriell klarar differenssättningar i olika grad, nedan listas några vanligt förekommande stommsystem:

- Träregelstomme
- Platsgjuten betongstomme
- Stålstomme
- Bärande väggar av murverk tillsammans med bjälklag av trä, stål eller förspända betongelement
- Prefabricerade betongelement

Tabell 3.14 redovisar ett antal stommateriell. Materialen är redovisade i fallande ordning utifrån dess kapacitet att klara sättningsdifferenser utan att erhålla skador. Maximal sättnings för byggnader med stommateriell har beskrivits i tabell 3.5. Tabell 3.14 har dock kompletterats med stommateriell trä. Byggnader med träregelstomme tolererar relativt stora differenssättningar på grund av materialets flexibilitet. Stommar uppbyggda av armerad betong, stål eller tegel klarar generellt dubbelt så stor sättnings som stommar av sten (Powers, 1985).

Tabell 3.14 – Rangordnade stommaterial utifrån kapacitet att motstå differenssättningar utan att erhålla skador.

Stommaterial

Trä

Armerad betong, stål, tegel

Sten

Blockelement av betong

3.3.2 Ålder, befintligt skick och sättnings hastighet

Det är viktigt att notera en byggnads befintliga skick för att kunna bedöma dess kapacitet att genomgå en förväntad differenssättning (D'Appolonia, 1971). Det finns ett samband mellan en differenssättnings påverkan på en byggnad och byggnadens styvhet. Byggnader med låg styvhet är känsliga för påfrestningar då de tenderar att följa markens deformationsprofil i större utsträckning. Moderna byggnader, med exempelvis armerad betong, har en hög styvhet och följer därför inte markens sättning i samma utsträckning (Leca & New, 2006). Äldre byggnader kan vara särskilt känsliga för differenssättningar och har generellt en större risk för skador än nyare konstruktioner. Exempelvis kan äldre byggnader av murverk eller betong vara särskilt känsliga för differenssättningar då dessa byggnader blir mer spröda med tiden.

Byggnader som har befintliga differenssättningar kan vid en tillkommande sättning få omfattande skador. Extra uppmärksamhet bör därför riktas mot byggnader med befintliga differenssättningar (D'Appolonia, 1971). Vid bedömning av en sättnings påverkan på byggnader är utvecklingshastigheten av sättningen viktigt att beakta. Skador på en byggnad uppkommer ofta inte om sättningen får ske under en längre tid. En långsam sättning möjliggör en krypdeformation av byggnaden allt eftersom att sättningen fortgår (D'Appolonia, 1971). Det är i kohesionsjord som de största sättningarna vid en styrd grundvattensänkning sker. Fullt utvecklade sättningar i dessa jordar tar dock lång tid.

4 Metodik för riskklassificering

Följande del av rapporten innehåller resultatet av detta examensarbete – ett förslag till en metodik för att riskklassificera byggnader vid en styrd grundvattensänkning. Klassificeringen är baserad på den teori som tidigare har presenterats i rapporten. Kapitlet inleds med en beskrivning av vad metodiken innehåller samt när, var och hur den kan tillämpas. Därefter följer en processbeskrivning för riskklassificering samt en diskussion.

4.1 Inledning

Metodiken beskriver en process för att riskklassificera byggnader som påverkas av en styrd grundvattensänkning. Metodiken är avsedd att användas i inledande förstudier. Med hjälp av metodiken bestäms antalet riskobjekt. Med kännedom om antalet riskobjekt kan förebyggande av skador eller reparationer budgeteras in i ett tidigt stadium i byggprocessen. Risken för oväntade kostnader längre fram i projektet blir därmed lägre. Arbetsformen kan tillämpas vid alla typer av byggprojekt där risk föreligger för skador till följd av differenssättningar. Metoden är generell och begränsas inte av ett projektspecifikt innehåll såsom projektuppgift eller områdets utformning. En byggnad bedöms utifrån ett antal byggnadsfaktorer som påverkar byggnadens kapacitet att genomgå en differenssättning utan att få estetiska eller funktionella skador. Byggnader inom påverkansområdet delas in i byggnadskategorier som beskriver ett värde för tillåten lutning av byggnaden. Sättningsprofilen inom påverkansområdet delas in i så kallade lutningszoner. Riskobjekt identifieras genom en jämförelse mellan tillåten lutning enligt byggnadskategori och värdet på lutning för den lutningszon som byggnaden finns inom.

4.2 Riskklassificering

I detta avsnitt följer en processbeskrivning för metodiken. Beskrivningen inleds med nödvändig ingångsdata. Ett poängsystem presenteras som används för att placera en byggnad i en byggnadskategori. Fastställt påverkansområde delas därefter in i så kallade lutningszoner. En riskklassificering kan sedan ske genom jämförelse av värden enligt byggnadskategori och lutningszon.

4.2.1 Ingångsdata

Metoden följer ett stegvist arbetssätt där viss ingångsdata erfordras innan processen inleds. Nedan listas information som förutsätts vara tillgänglig innan klassificeringen inleds,

- Lokalisering av befintliga byggnader
- En geomodell innehållande områdets geologi och hydrologi
- Avsänkningstratt och markerat påverkansområde
- Sättningsberäkning för påverkansområdet

Byggnader inom påverkansområdet ska vara lokaliserade. Detta är nödvändigt för det fortsatta arbetet med att identifiera potentiella riskobjekt. I och med att det är byggnader som ska observeras behandlas inte områden utan byggnader i det fortsatta arbetet.

För att kunna bedöma sättningar inom påverkansområdet krävs en beskrivning av områdets geologi och hydrologi. Denna beskrivning sammanfattas lämpligast i en geomodell som visar befintlig grundvattennivå samt tjocklek och djup för skikt av olika jord- och bergarter. Geomodellen ska även innehålla värden på nödvändiga beräkningsparametrar för att sättningsberäkningar ska kunna utföras. En avsänkningstratt i plan och profil är nödvändig för att kunna bedöma sättningens utbredning och storlek. Avsänkningstratten i plan markerar grundvattensänkningens

påverkansområde. Profilen för avsänkningen möjliggör att spänningsökningen för en godtycklig punkt inom påverkansområdet kan uppskattas. En god approximation av spänningsökning i marken bidrar till en bra uppskattning av sättningsprofilen. Avsänkning och sättning pågår under hela pumpningsperioden. Sättningen beräknas för den maximala tiden för uttag av grundvatten för att ta hänsyn till tidsberoende sättningar och för att få störst värde på förväntad sättning.

4.2.2 Poängsystem

Ett poängsystem används för att bedöma en byggnads kapacitet utifrån fyra stycken faktorer, byggnadens *längd*, *grundläggning*, *stomme* och *fasad*. Egenskaper inom faktorerna ges poäng beroende på hur stor påverkan egenskaperna har på byggnadens kapacitet. Höga poäng ges till egenskaper som medför en hög kapacitet och låga poäng ges till egenskaper som medför en större känslighet för differenssättningar. Den egenskap som anses ha lägst tolerans för en differenssättning tilldelas 0 poäng.

Ett första steg för att effektivisera riskklassificeringen är att identifiera områden inom påverkansområdet där byggnader har likvärdiga egenskaper inom ovan nämnda faktorer. En sådan indelning effektiviserar insamling av data som behövs för det kommande arbetet. Byggnader med snarlika byggnadsegenskaper kan antas ha samma kapacitet att klara differenssättningar. Värdet för längd, typ av grundläggning, stomme och fasad på vald byggnad får representera det identifierade området. Därmed behöver inte samtliga byggnader inom området inventeras. Ett exempel på ett område med likvärdiga egenskaper kan vara ett bostadsområde som har anlagts under samma tid och med likvärdig utformning och byggnadsteknik. Nedan redovisas faktorerna som bedöms inom metodiken med tillhörande egenskaper och poäng.

Byggnadens längd

En styrd grundvattensänkning medför att byggnader inom påverkansområdet genomgår ojämna sättningar. En längre byggnad är mer känslig för en sättningsdifferens än en kortare byggnad då en längre byggnad i större grad behöver krökas för att följa deformationsprofilen. En byggnads längd bedöms enligt tabell 4.1. Längden avser byggnadens utsträckning parallellt med grundvattnets flödesriktning mot uttagsplatsen. Vid osäkerhet i valet av längd väljs den mest ogynnsamma, den största längden.

Tabell 4.1 – Bedömning av en byggnads längd med tillhörande poäng.

Byggnadens längd (m)	Poäng
≤ 10	12
20	9
30	6
40	3
≥ 50	0

I tabell 4.1 har en linjär fördelning bestämts mellan längd och poäng vilket tillåter en interpolering för längder som inte är representerade i tabellen. Byggnader med en längd på 10 meter eller kortare tilldelas 12 poäng. Byggnader med en längd på 50 meter eller mer tilldelas 0 poäng. En vidare diskussion om faktorn längd förs i avsnitt 4.3.

Typ av grundläggning

Byggnader som är grundlagda på pålar har i relation till övriga grundläggningstyper en hög kapacitet att kunna genomgå marksättningar utan att erhålla skador. Spetsburna pålar bedöms ha en högre kapacitet än mantelburna pålar. De senare kan utsättas för en nedåtdragande effekt vid en grundvattensänkning. Platta på mark bedöms vara ett bättre alternativ än en grundläggning med fundament. I jämförelse med fundament är platta på mark en starkt armerad, styv konstruktion med en högre tolerans mot en sättningsdifferens. Byggnader som är grundlagda på långsgående fundament ges högre poäng än byggnader som är grundlagda på enskilda fundament. Enskilda fundament följer i högre grad markens sättningsprofil vilket kan ge upphov till skador på byggnaden. Tabell 4.2 visar de olika grundläggningsalternativen med tillhörande poäng för bedömning.

Tabell 4.2 - Poäng för typ av grundläggning.

Typ av grundläggning	Poäng
Spetsburna pålar	6
Mantelburna pålar	4
Platta på mark	3
Långsgående fundament	2
Enskilda fundament	0

Typ av stomme

Motivering till poäng av byggnadsstomme har grundats på tabell 3.5, 3.8, 3.12 och 3.14 i tidigare del av rapporten. Tabellerna 3.5 och 3.14 beskriver kapacitet för olika typer av stommaterial. I tabell 3.14 kan utläsas att en stomme av trä, stål eller armerad betong har en hög tolerans mot en differenssättning. En stomme med blockelement av betong har lägst tolerans. Tabell 3.8 och 3.12 visar klassificering av byggnadsmaterial utifrån materialets vibrationskänslighet. Högst klassat, i klass 1 finns armerad betong, stål och trä. I klass 2 finns byggnadsmaterial tegel. Autoklaverad lättbetong finns i den näst lägsta klassen. Tabell 4.3 redovisar poäng till bedömning av typ av stomme.

Tabell 4.3 - Poäng för typ av stomme.

Typ av stomme	Poäng
Armerad betong	6
Stål	6
Trä	6
Tegel	4
Blockelement av betong	0

Typ av fasad

Motivering för poäng till olika fasadmaterial är grundat på tabell 3.8 och 3.12. I tabellerna klassificeras olika byggnadsmaterial i fallande ordning. Högst klassificeras trä med efterföljande tegel och puts. Trä är ett flexibelt material och har därmed en hög tolerans mot differenssättningar. I tabell 4.4 redovisas poäng till bedömning av typ av fasad.

Tabell 4.4 - Poäng för typ av fasad.

Typ av fasad	Poäng
Träpanel	2
Tegel	1
Puts	0

4.2.3 Indelning av byggnadskategori

Efter tilldelning av poäng från tabell 4.1 – 4.4 erhålls en poängsumma för en byggnad. Med utgångspunkt från denna summa kan en byggnadskategori utläsas i tabell 4.5. Byggnader inom kategori A har högst kapacitet. Byggnader inom kategori D har därmed den minsta toleransen mot en sättningsdifferens. För varje byggnadskategori anges ett värde för tillåten lutning. Tillåten lutning för byggnadskategorierna inkluderar summan av förväntad och befintlig differenssättning.

Tabell 4.5 - Byggnadskategori och tillåten lutning utifrån poängsumma.

Poäng	Byggnadskategori	Tillåten lutning
22 – 26	A	4 ‰
16 – 21	B	3 ‰
9 – 15	C	2 ‰
0 – 8	D	1 ‰

Tillåten lutning har valts med hänsyn till gränsvärden som har presenterats tidigare i rapporten. Gränsvärden är tidigare beskrivna som en kvot av sättningsdifferens och avstånd mellan två punkter. Tabell 4.5 uttrycker istället lutningar i promille. Gränsvärden har satts mellan 1 och 4 ‰ vilket motsvarar en kvot 1/1000 respektive 1/250.

Byggnadskategori A har den största toleransen mot en sättningsdifferens. Enligt tabell 3.3 och 3.4 bedöms gränsvärdet 1/250 ge synliga skador på en byggnad. Värdet för byggnadskategori A är även grundat utifrån tabell 3.5 som beskriver en maximal sättning och lutning av en byggnad beroende på stommaterial. En lutning på 4,2 ‰ är en övre gräns för byggnader med stommaterial av armerad betong, stål eller tegel. Enligt föreslagen metodik måste en byggnad, för att uppnå kategori A, ha ett stommaterial av armerad betong, stål eller tegel. Byggnadskategori B förväntas ha en mindre kapacitet mot sättningsdifferenser än byggnadskategori A och ges en gränslutning på 3 ‰. Enligt tabell 3.4 förväntas en lutning 1/300 ge sprickor i träväggar. Byggnadskategori C tilldelas en gränslutning på 2 ‰. Enligt tabell 3.3 anses det osannolikt att 1/500 ger strukturella skador och enligt tabell 3.4 beskrivs lutningen som en säker gräns om sprickor inte tillåts uppkomma. Byggnadskategori D har den minsta kapaciteten mot en sättningsdifferens. Enligt tabell 3.4 bedöms en lutning 1/800 ge en försumbar påverkan på byggnader. Gränsvärdet för byggnadskategori D väljs till 1 ‰ vilket ger en bedömning på säkra sidan.

4.2.4 Tillämpning av poängsystem och byggnadskategori

Tabell 4.6 och 4.7 redovisar två stycken räkneexempel där poängsystemet och indelning av byggnadskategorier tillämpas. Exempel I är en byggnad som är 20 meter lång i riktning med grundvattenflödet, grundlagd med spetsburna pålar, uppbyggd av träregelstomme samt med en fasad av träpanel. Efter sammanräkning av poäng från tabell 4.1 – 4.4 tilldelas byggnaden 23 poäng.

Enligt tabell 4.5 placeras byggnaden inom byggnadskategori A vilket innebär att den tillåtna lutningen är 4 ‰. Tabell 4.6 visar byggnadens egenskaper, tilldelad poäng samt byggnadskategori.

Tabell 4.6 - Räkneexempel I för tillämpning av poängsystem och indelning av byggnadskategori.

Faktor	Byggnadsegenskap	Poäng
Byggnadens längd	20 meter	9
Typ av grundläggning	Spetsburna pålar	6
Typ av stomme	Trästomme	6
Typ av fasad	Träpanel	2
		Σ 23 → Byggnadskategori A

Exempel II är en byggnad med samma typ av grundläggning, stomme och fasad som byggnaden i exempel I. Byggnaden i exempel II har däremot en längd på 30 meter. Byggnaden erhåller 20 poäng och placeras inom byggnadskategori B, vilket innebär att den tillåtna lutningen är 3 ‰. Tabell 4.7 visar byggnadens egenskaper, tilldelad poäng samt byggnadskategori.

Tabell 4.7 - Räkneexempel II för tillämpning av poängsystem och indelning av byggnadskategori.

Faktor	Byggnadsegenskap	Poäng
Byggnadens längd	30 meter	6
Typ av grundläggning	Spetsburna pålar	6
Typ av stomme	Trästomme	6
Typ av fasad	Träpanel	2
		Σ 20 → Byggnadskategori B

4.2.5 Ytterligare observationer

Det finns fler faktorer som kan påverka kapaciteten av en byggnad än de som har redovisats i tabell 4.1 – 4.4. Exempel på sådana faktorer kan vara en byggnads grundläggnings- eller markförhållanden, ålder eller befintlig sättning. För att avgöra påverkan av dessa faktorer krävs en projektspecifik bedömning som är grundad på erfarenhet. Det är komplicerat att bedöma dessa faktorer generellt och de är därför inte viktade såsom faktorerna inom tabell 4.1 – 4.4. En byggnad kan efter klassificering enligt tabell 4.5, möjligen nedgraderas till en lägre byggnadskategori efter att dessa faktorer tagits med i bedömningen.

Skillnad i grundläggning och markförhållande

Utöver sättningsskillnaden som avsnäkningsprofilen ger upphov till kan styvhetskillnader i en byggnads grundläggning bidra till en ökad differenssättning och därmed risken för skada. Byggnader med olika styvheter i grundläggningen är därför viktiga att observera. Storleken på differenssättningen är beroende på skillnaden i styvhet mellan de olika grundläggningarna. En större sättning, i förhållande till den styvare grundläggningen, kommer att ske av den byggnadsdel som är grundlagd med en mindre styv grundläggning. Exempel på en sådan grundläggning kan vara en byggnad som är delvis grundlagd på pålar och delvis grundlagd på fundament.

Byggnader med olika styvheter i underliggande mark bör observeras. En större sättning kommer att ske i den mjukare marken vilket ger upphov till en differenssättning. Exempel på ett sådant förhållande kan vara en byggnad som är delvis byggd på lera och delvis på grus.

Befintlig sättning och ålder

En befintlig sättningsdifferens påverkar bedömningen av tillåten lutning. Det är därför viktigt att byggnader inom påverkansområdet med befintliga differenssättningar observeras inför en grundvattensänkning. Ett exempel på en tillämpning kan vara byggnaden i exempel I som tilldelades kategori A med en tillåten lutning på 4 ‰. Enligt metodiken, tabell 4.5, bedöms en byggnads kapacitet mot en total differenssättning, summan av befintlig och förväntad differenssättning. Om byggnaden i exempel I har en befintlig differenssättning som motsvarar 2 ‰ bör byggnaden nedgraderas till byggnadskategori C med en tillåten lutning på 2 ‰ för att undvika uppkomst av skador.

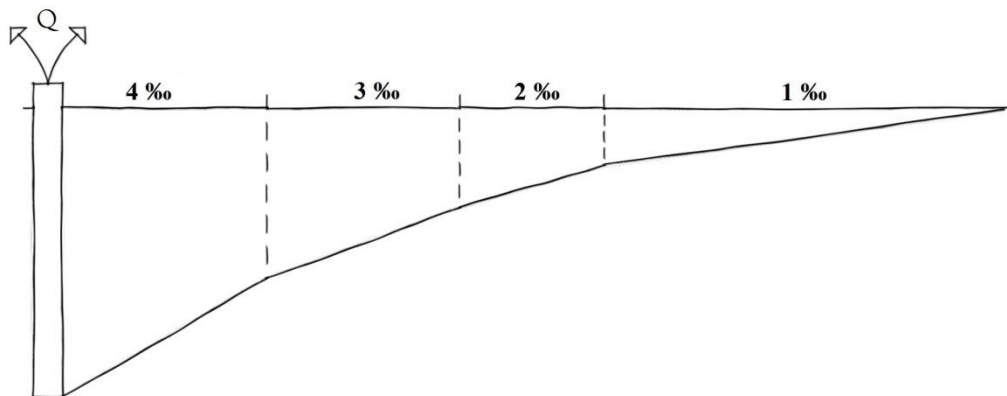
En byggnads befintliga skick är svårbedömt och kräver en enskild bedömning grundad på erfarenhet. Äldre byggnader kan vara särskilt känsliga för differenssättningar då byggnadsmaterial kan ha blivit mer spröda med tiden. Äldre byggnader kan även ha ett historisk värde vilket inte kan värderas med poäng i en generell metodik. Äldre byggnader är av ovanstående anledningar viktiga att observera.

4.2.6 Lutningszoner

När en sättningsberäkning för påverkansområdet har genomförts kan den förväntade marknivån markeras med punkter i en tvärsnitt. Genom att rätta linjer binder samman punkterna i tvärsnittet kan en förenklad sättningsprofil upprättas. Utifrån den förenklade sättningsprofilen kan påverkansområdet delas in i lutningszoner. Lutningen för en lutningszon, θ , kan uttryckas genom förhållandet mellan sättningsdifferensen, $\Delta\delta$, och avståndet mellan punkterna, L , det vill säga,

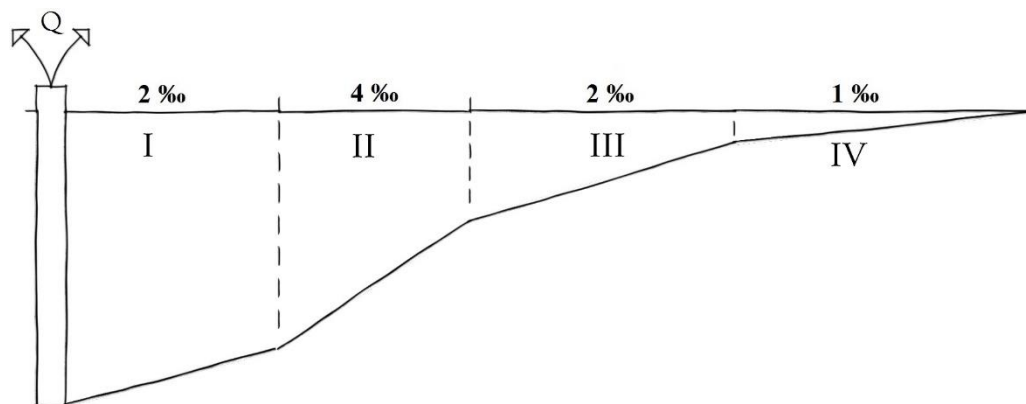
$$\theta = \frac{\Delta\delta}{L} \quad (4.1)$$

Vid ett antagande om en förenklad homogen geomodell, utan hänsyn till variationer i jordmaterial och grundvattennivå, minskar sättningsstorlek med avståndet från brunnen. Zonen närmast brunnen har då störst lutning. Lutningen för zonerna avtar därefter med avståndet från brunnen. Principen för lutningszoner vid ett antagande om en homogen geomodell visas i figur 4.1.



Figur 4.1 - Principfigur för indelning av lutningszoner vid antagande av en förenklad homogen geomodell.

Vid tillämpning av en geomodell där hänsyn tagits till variationer i jordmaterial och befintlig grundvattennivå är lutningen på zonerna inte nödvändigtvis avtagande med avståndet från brunnen. Figur 4.2 visar principen för hur lutningszoner kan förekomma i ett påverkansområde där en geomodell med hänsyn till kända avvikelser har tillämpats.



Figur 4.2 – En principfigur för indelning av lutningszoner vid tillämpning av en geomodell med hänsyn till variationer i jordmaterial och befintlig grundvattennivå.

Längden på en lutningszon bör inte understiga längden för den kortaste byggnaden inom påverkansområdet. Längden begränsas för att undvika att byggnader är placerade mellan två stycken lutningszoner.

4.2.7 Identifiering av riskobjekt

En riskklassificering av byggnader sker genom en jämförelse mellan tillåten lutning enligt tabell 4.5 och lutningszoner enligt avsnitt 4.2.6. Byggnader klassificeras som riskobjekt om de är kategoriserade att tåla en mindre lutning än den lutning som förväntas inom den aktuella zonen. I exempelvis figur 4.2 förväntas lutningszonen närmast brunnen, zon I, samt zonen näst längst ut, zon III, en lutning på 2 ‰. I dessa zoner bör byggnader med byggnadskategori D klassificeras som riskobjekt. I zonen näst närmast brunnen, zon II, med en lutning på 4 ‰, bör byggnader inom byggnadskategori B, C och D bedömas som riskobjekt. Ingen byggnad bör anses som ett riskobjekt i zon IV med en lutning på 1 ‰. Efter riskklassificering summeras antalet riskobjekt. För att undvika skador på riskobjekten bör en diskussion föras om eventuella förebyggande åtgärder. Ett alternativ till att utföra förebyggande åtgärder är att acceptera skaderisken då det i en del fall kan vara mer ekonomiskt att reparera en skada i efterhand.

4.3 Diskussion kring föreslagen metodik

De fyra faktorerna i tabell 4.1 – 4.4 viktas mot varandra genom olika poängintervall. Störst poängintervall har byggnadens längd då denna faktor antas ha störst påverkan på en byggnads kapacitet. En linjär fördelning har valts mellan längd och tilldelad poäng. Möjligen hade en olinjär fördelning varit mer rimlig och kunnat påvisa faktornas betydelse för omfattningen av eventuella skador. En sådan fördelning har dock inte föreslagits då det inte funnits tillräckligt med information för att kunna dra sådana slutsatser. Om en längd inte förekommer inom tabell 4.1 är det möjligt att interpolera. Detta förutsätter att den efterfrågade längden är mellan tabellens värden på 10 och 50 meter. Maximal poäng tilldelas byggnader som är 10 meter eller kortare vilket medför en bedömning på säkra sidan. Byggnader som är 50 meter eller längre tilldelas 0 poäng. Längre byggnader har troligen en lägre kapacitet men tilldelas samma poäng oavsett längd över 50 meter. En byggnad som är 50 meter eller längre kan efter bedömning av samtliga faktorer högst uppnå

byggnadskategori C vilket innebär en tillåten lutning på 2 ‰. Poängsystemet anses därmed ge en tillräckligt säker bedömning för byggnader över 50 meter då byggnadskategori C påvisar en byggnad som är känslig för en differenssättning. Möjligen kan metodiken begränsas till byggnader med en övre gräns för längd. En sådan begränsning kräver dock mer kunskap om hur en byggnads längd påverkar omfattningen av skador vid en differenssättning. Typ av grundläggning och typ av stomme antas ha en lika stor påverkan på en byggnads kapacitet. Faktorerna ges därför samma poängintervall, 0 – 6 poäng, vilket är hälften av poängintervallet för längd. Typ av fasad antas ge minst påverkan av de fyra faktorerna och ges därför ett lågt intervall på 0 – 2 poäng.

Det framgår genom räkneexemplen i tabell 4.6 och 4.7 att en egenskap inte nödvändigtvis är kopplad till en byggnadskategori. En byggnad som är grundlagd på spetsburna pålar anses ha den mest säkra grundläggningsmetoden, trots detta kan övriga byggnadsegenskaper leda till att byggnaden placeras i en lägre byggnadskategori.

En fackmannamässig bedömning tillämpas vid fall där en byggnads egenskap såsom typ av grundläggning, stomme eller fasad inte återfinns i tabell 4.1 – 4.4. Det finns troligen fler egenskaper som kan påverka omfattningen av skada än de som behandlas inom metodiken. Vidare utredningar bör utföras för att i framtiden kunna upprätta en mer omfattande metodik som tar hänsyn till flera faktorer och byggnadsegenskaper.

Riskklassificering enligt denna metodik fokuserar på estetiska och funktionella skador på en byggnad. Tillåten lutning för byggnadskategorierna har därför valts till 1 – 4 ‰. Vid lutningar inom detta intervall är det inte troligt att strukturella skador uppstår. Rapportens teoridel, kapitel 3, innehåller även gränsvärden för lutning med en trolig strukturell skada som utgång. Metodiken hade möjligen kunnat utökas med fler byggnadskategorier som representerar sådana skador. Detta har inte ansetts nödvändigt då målet med metodiken har varit att föreslå en process för hur byggnader kan riskklassificeras. Fler byggnadskategorier hade inte påverkat beskrivningen av processen. Vid behov är det möjligt för användaren av metodiken att ta hänsyn till fler gränsvärden genom att lägga till byggnadskategorier med högre värden för tillåten lutning. Om större lutningar förväntas uppkomma i lutningszonerna än de som har presenterats i tabell 4.5 kan det vara nödvändigt att utöka med fler byggnadskategorier som representerar mer allvarliga skador. En sådan utökning av byggnadskategorier bör ske efter att lutningszoner har studerats.

5 Praktisk tillämpning

Följande kapitel innehåller en praktisk tillämpning av den metodik som har föreslagits i kapitel 4. För att utvärdera användandet av den föreslagna metodiken genomförs en bedömning av två stycken byggnader. Byggnaderna påverkas av en grundvattensänkning i samband med en byggnation av en järnvägstunnel och har av ett konsultbolag bedömts som riskobjekt. Bedömd kapacitet för byggnaderna enligt den föreslagna metodiken kan jämföras med uppskattad kapacitet enligt konsultbolaget. Av jämförelsen framgår skillnader och likheter i resultat mellan de olika bedömningarna.

5.1 Bedömning enligt föreslagen metodik och konsultbolag

I den föreslagna metodiken beskrivs att byggnader delas in i byggnadskategorier och hur ett påverkansområde delas in i lutningszoner. I dagens läge saknas sättningsberäkningar av påverkansområdet. Utan sättningsberäkningar kan inte påverkansområdet delas in i lutningszoner vilket förhindrar en komplett riskklassificering. Utvärdering av metodiken har därför begränsats till en jämförelse mellan uppskattad kapacitet för byggnaderna.

För byggnader utan tidigare skador orsakade av sättningar bedömer konsultbolaget att skador uppkommer vid en lutning² på 2 ‰ inom byggnaden. Värdet är baserat på erfarenhet från tidigare projekt. Lutningen innebär en differenssättning på 20 mm över ett avstånd på 10 meter. Konsultbolaget anser det vara enklare att utföra en riskklassificering utifrån ett sättningsbelopp och väljer därför att studera storleken på förväntad sättningsbelopp. Byggnader som förväntas genomgå en sättningsbelopp på 20 mm eller större bedöms som riskobjekt.

5.2 Utvärdering av bedömning

I följande avsnitt presenteras bedömd kapacitet enligt föreslagen metodiken för två byggnader inom påverkansområdet. Byggnaderna ges benämningar X och Y. De egenskaper som behövs för en bedömning har hämtats från konstruktionsritningar och arbetsbeskrivningar. Tre stycken jämförelser mellan bedömd kapacitet enligt föreslagen metodik och enligt konsultbolag presenteras,

- Tillåten lutning enligt föreslagen metodik jämförs med lutningen på 2 ‰ som konsultbolaget bedömer ger upphov till skador.
- Sättningsbelopp beräknas utifrån värdet för tillåten lutning enligt föreslagen metodik och byggnadens längd. Beräknad sättningsbelopp jämförs med riktvärdet på 20 mm som används av konsultbolaget.
- Lutning för en byggnad beräknas utifrån byggnadens längd och riktvärdet enligt konsultbolaget på 20 mm. Beräknad lutning jämförs med värdet för tillåten lutning enligt föreslagen metodik.

5.2.1 Byggnad X

Byggnad X är från år 1880. Bygghandlingar som beskriver uppförandet saknas. Ombyggnationer har skett efter uppförandet. Information om byggnadens egenskaper har hämtats från en arbetsbeskrivning och relationsritningar som beskriver ombyggnation. I arbetsbeskrivningen beskrivs bland annat utförandet av grundarbetet. Det står att grävning ska utföras till fast botten eller minst så djupt som ritningarna visar. I arbetsbeskrivningen beskrivs även armeringsarbeten för betongplatta. Grundläggningen antas vara en platta på mark. Enligt arbetsbeskrivningen består

² Konsultbolaget bedömer att skador uppkommer vid en sättningsgradient 1:500

fasadmaterialet av tegel, vilket också går att fastställa vid en okulär besiktning. I en av relationsritningarna beskrivs tre stycken väggtyper. Väggtyp I består av stålreglar, typ II av lättbetongblock och typ III av tegel. Ritningen visar att de flesta väggarna är uppbyggda av typ I och III medan endast ett fåtal väggar av typ II. En stomme av tegel har enligt metodiken en lägre kapacitet än en stomme av stål. Stommaterial väljs därför till tegel vilket ger en bedömning på säkra sidan. Byggnadens längd i riktning med grundvattenflödet mäts till 14 meter. Tabell 5.1 redovisar byggnadsegenskaperna för byggnad X, tilldelade poäng och byggnadskategori. Byggnad X placeras enligt den föreslagna metodiken i byggnadskategori B vilket medför en tillåten lutning på 3 ‰.

Tabell 5.1 - Bedömning av byggnad X enligt föreslagna metodik.

Faktor	Byggnadsegenskap	Poäng
Byggnadens längd	14 meter	11
Typ av grundläggning	Platta på mark	3
Typ av stomme	Tegel	4
Typ av fasad	Tegel	1
		Σ 19 → Byggnadskategori B

Byggnad X har enligt metodiken en relativt hög kapacitet mot en differenssättning. Ett fåtal ritningar och arbetsbeskrivningar har varit möjliga att studera inför kategoriseringen. Underlaget anses inte vara tillräckligt omfattande för att med säkerhet kunna fastställa bedömningen. Det finns en osäkerhet i typ av grundläggning och stommaterial då det funnits bristfälligt med information att tillgå. Grundläggning och stomme påverkar kategoriseringen i hög grad. Enligt den föreslagna metodiken är längden den faktor som har störst betydelse. Byggnadens längd i riktning med grundvattenflödet är relativt kort i förhållande till längderna i tabell 4.1. Byggnaden ges därmed hög poäng för faktorn vilket leder till den relativt höga kategoriseringen.

Byggnad X kan klassificeras i en lägre kategori efter att ytterligare observationer har beaktats, exempelvis ålder, befintliga sättningar eller skillnad i mark- eller grundläggningsförhållande. Då konsultbolagets riktvärde gäller för byggnader utan tidigare sättningsskador förutsätts att befintliga sättningar inte förekommer hos byggnad X. Byggnad X kan beroende på ålder vara känslig för differenssättning.

Jämförelse mellan bedömning enligt metodik och konsultbolag

- Tillåten lutning enligt den föreslagna metodiken, 3 ‰, är större än den lutning på 2 ‰ som konsultbolaget bedömer ge upphov till skador.
- En längd på 14 meter och en tillåten lutning på 3 ‰ ger en sättning på 42 mm enligt föreslagna metodik. Värdet är större än konsultbolagets värde på 20 mm.
- Enligt den föreslagna metodiken fördelas en sättning över hela byggnadens längd. Konsultbolaget tar inte hänsyn till en byggnads faktiska längd utan antar att en sättning på 20 mm kan ge upphov till en lutning på 2 ‰ eller större. Om lutningen beräknas genom att sättningen på 20 mm fördelas över hela byggnadens längd, 14 meter, fås en lutning på 1,4 ‰. Denna beräkning kan påvisa att konsultbolaget möjligen överskattar risken för skada på byggnaden då lutningen inte uppnår 2 ‰.

5.2.2 Byggnad Y

Byggnad Y är ett flerfamiljs- och affärshus från sent 1800 – tal. Bygghandlingar som beskriver uppförandet saknas. Information om byggnadens egenskaper har hämtats från dokument gällande bygglov och besiktning av en till- och ombyggnation. Det framgår att grundläggning av tillbyggnaden har utförts med en platta på mark. Tillbyggnaden har en yttervägg med betongblock och en fasad av tegel. Ytterväggen i ombyggnationen är utförd med en träregelstomme. Enligt metodiken har trä en högre kapacitet än betongblock. Typ av stomme väljs därför till blockelement av betong. Byggnadens längd i riktning med grundvattenflödet mäts till 20 meter. Tabell 5.2 redovisar byggnadsegenskaperna för byggnad Y, tilldelade poäng och byggnadskategori. Byggnad Y placeras i byggnadskategori C vilket medför en tillåten lutning på 2 ‰.

Tabell 5.2 - Bedömning av byggnad Y enligt föreslagen metodik.

Faktor	Byggnadsegenskap	Poäng
Byggnadens längd	20 meter	9
Typ av grundläggning	Platta på mark	3
Typ av stomme	Blockelement av betong	0
Typ av fasad	Tegel	1
		Σ 13 → Byggnadskategori C

Val av egenskaper för byggnad Y utgår från dokument som beskriver en till- och ombyggnation. Underlaget ger begränsat med information om de faktorer som bedöms inom metodiken. Exempelvis har information om grundläggning endast funnits för tillbyggnaden. Konstruktionen är inte den samma för tillbyggnaden och ombyggnaden. Vid bedömning av byggnadsegenskaperna har de egenskaper som innebär lägst kapacitet enligt metodiken valts. Byggnad Y kan klassificeras i en lägre kategori grundat på ytterligare observationer. Befintliga sättningar antas ej förekomma då konsultbolaget i bedömning av byggnaden tillämpar ett riktvärde anpassat för byggnader utan tidigare sättningsskador. Byggnaden kan beroende på dess höga ålder vara känslig för differenssättning. Om hänsyn tas till befintligt skick och eventuell skillnad i mark- eller grundläggningsförhållanden kan byggnaden möjligen klassificeras i en lägre byggnadskategori.

Jämförelse mellan bedömning enligt metodik och konsultbolag

- Byggnad Y bedöms enligt den föreslagna metodiken ha en kapacitet motsvarande 2 ‰. Även konsultbolaget bedömer att en lutning på 2 ‰ kan ge upphov till skador.
- En längd på 20 meter och en tillåten lutning på 2 ‰ ger en sättning på 40 mm enligt föreslagna metodik. Värdet är större än konsultbolagets värde på 20 mm.
- Enligt den föreslagna metodiken fördelas en sättning över hela byggnadens längd. Om lutningen beräknas genom att tillåten sättning enligt konsultbolaget på 20 mm fördelas över byggnadens längd, 20 meter, fås en lutning på 1 ‰. Denna beräkning kan påvisa att konsultbolaget möjligen överskattar risken för skada på byggnaden.

5.3 Slutlig kommentar

Tabell 5.3 presenterar en sammanställning av jämförelsen mellan bedömd kapacitet enligt föreslagen metodik och enligt konsultbolaget. Föreslagen metodik presenteras med värden för tillåten lutning enligt byggnadskategori samt storlek på sättning utifrån tillåten lutning och byggnadens längd. Bedömning enligt konsultbolaget presenteras med värdet för lutning som bedöms ge skador och riktvärde för sättning. Tabellen redovisar även värdet på lutning då riktvärdet för sättning fördelas över byggnadens längd.

Tabell 5.3 - Sammanställning av kapacitet enligt metodik och konsultbolag.

	Föreslagen metodik		Konsultbolag		
	Tillåten lutning	Sättning	Lutning	Riktvärde sättning	Sättning fördelad över längd
Byggnad X	3 ‰	42 mm	2 ‰	20 mm	1,4 ‰
Byggnad Y	2 ‰	40 mm	2 ‰	20 mm	1 ‰

Bedömd kapacitet enligt metodiken är generellt högre än bedömd kapacitet enligt konsultbolaget. Det framgår att accepterad sättning enligt metodiken är markant större än riktvärdet enligt konsultbolaget. Detta beror på den generellt högre tillåtna lutningen i kombination med en större längd, 14 respektive 20 meter. Konsultbolaget bedömer att en lutning på 2 ‰ kan ge upphov till skador på byggnader. Lutningen ger en tillåten sättning på 20 mm vid ett antagande av en längd på 10 meter. Lutningen minskas till 1,4 respektive 1 ‰ när hänsyn tas till byggnadens faktiska längd. Resultatet kan påvisa att konsultbolaget överskattar risken för skada, då lutningen inte uppnår skadegränsen på 2 ‰, när sättningen antas fördelas över hela byggnadens längd.

Om hänsyn tas till de ytterligare observationer som har beskrivits i metodiken kan byggnaderna möjligen klassificeras till en lägre byggnadskategori. En sådan nedklassificering kräver dock erfarenhet och en bedömning på plats. Om byggnad X klassificeras ned till byggnadskategori C minskar den bedömda kapaciteten till 2 ‰. Om byggnad Y nedklassificeras ett steg blir bedömd kapacitet 1 ‰.

6 Diskussion och slutsats

Detta kapitel innehåller en diskussion kring resultatet av examensarbetet, vilka för- och nackdelar som har uppmärksammats samt arbetets slutsats. Kapitlet avslutas med förslag till fortsatt arbete inom ämnet.

6.1 Diskussion kring resultatet

I arbetet har en metodik för systematisk riskklassificering av byggnader utarbetats. Den föreslagna metodiken kan underlätta riskklassificering av byggnader vid en styrd grundvattensänkning. Då det idag saknas en standard för en sådan riskanalys kan metodiken rationalisera arbetsgången och möjliggöra vinster i både tid och ekonomi. Genom detta examensarbete har ett arbete påbörjats som i framtiden kan ligga till grund och vara vägledande för upprättandet av en standard. Det anses därför positivt att processbeskrivningen enligt föreslagen metodik har likheter med gällande standarder för riskklassificering av byggnader. I både metodiken och standarderna beräknas ett riktvärde som beror på bedömning av ett antal faktorer. Utformning av lutningszoner som beskrivs i metodiken är inspirerad av de riskzoner som tidigare presenterats i rapporten. En fördel med riskklassificeringen enligt föreslagen metodik är att hänsyn tas till sättningsdifferenser istället för en jämn sättning. Bedömning av risk för skador enligt metodiken tar även hänsyn till en byggnads egenskaper.

Målet med arbetet har varit att föreslå en generell metod som går att tillämpa oberoende av typ av byggprojekt. En anledning till att det inte har upprättats en sådan metodik tidigare är troligen svårigheten att erhålla ett tillförlitligt värde för förväntad sättning då det är komplicerat att framställa en korrekt geomodell. En korrekt geomodell kräver en omfattande undersökning av påverkansområdet vilket kräver stora resurser i både tid och pengar. Utan vetskap om effekten av en grundvattensänkning är det svårt att bedöma risken för skador.

Teorin är bland annat baserad på data hämtad från tunnelarbeten, sprängningsarbeten och markarbeten såsom pålning, schaktning, spontning och packning. Teorin som den föreslagna metodiken bygger på är alltså inte hämtad från ett projektspecifikt fall för styrd grundvattensänkning. Till exempel är en del av rapportens gränsvärden anpassade för arbeten med tunnelbyggande. Problemet med data hämtad från tunnelarbeten är att marken vid deformation uppvisar både en sagging- och en hoggingprofil. Då deformationen vid en styrd grundvattensänkning endast uppvisar en hoggingprofil är värdena inte optimala för den föreslagna riskklassificeringen. En del av de gränsvärden som metodiken bygger på är anpassade för känsliga byggnader. Sådana gränsvärden har vägts in i utformningen av den föreslagna metodiken även om metodiken inte har begränsats till icke känsliga byggnader. Tillåten lutning för känsliga byggnader kan dock korrigeras inom metodiken vid ytterligare observationer.

Värden för tillåten lutning enligt byggnadskategorierna är baserade på en linjär deformationsprofil vilket är en förenkling av den verkliga deformationen. I verkligheten utsätts en byggnad för en ojämn deformation, där sättningen förändras kontinuerligt över byggnadens längd.

Det finns utrymme för förbättring av den föreslagna metodiken. Principen i metodiken, en jämförelse av tillåten lutning enligt byggnadskategori mot en lutningszon, är möjlig att använda även vid en bedömning med hänsyn till fler faktorer. Svårigheten med att ta fram en mer omfattande metodik beror på att det idag finns bristfälligt med undersökningar som beskriver hur byggnader skadas vid en styrd grundvattensänkning. Bristen beror troligen på avsaknad av rutin

och metod för insamling av relevant data. Utan ett omfattande underlag är det svårt att dra generella slutsatser som krävs för en bedömning av risk för skada.

6.2 Praktisk tillämpning

En praktisk tillämpning har utförts för att jämföra bedömning av kapacitet enligt den föreslagna metodiken med bedömd kapacitet enligt ett konsultbolag. Eftersom byggprojektet inte är genomfört och därmed ingen uppföljning av byggnadernas eventuella skador har gjorts går det i nuläget inte att avgöra vad som är en rimlig bedömning. Av jämförelsen framgår ändå skillnader mellan metoderna i både utförande och resultat. En bedömning enligt den föreslagna metodiken visade generellt på en högre kapacitet för byggnaderna. Det har vid bedömning enligt metodiken inte tagits hänsyn till ytterligare observationer. Hänsyn till detta hade möjligen medfört en lägre kapacitet för byggnaderna.

Vid den praktiska tillämpningen upptäcktes svårigheter vid identifiering av byggnadsegenskaper. Det var svårt vid bedömning av äldre byggnader att erhålla underlag med information om efterfrågade faktorer. Frågor uppkom vid bedömning av en byggnad med en tillbyggnad. Hur bör en sådan byggnad bedömas om utförandet av grundläggning, stomme eller fasad skiljer sig från huvudbyggnaden? Bör en viktning ske mellan de olika egenskaperna eller bör byggnaden bedömas som separata enheter? Vid den praktiska tillämpningen valdes den egenskap som fanns representerad med lägst poäng att gälla för byggnaden. Det gav troligen inte en optimal men en säker bedömning.

Det anses vara en fördel om en byggnad kan studeras på plats. En platsbedömning möjliggör exempelvis mätningar och bedömning av befintliga sättningar. Det vore även en fördel att kunna undersöka efterfrågade byggnadsegenskaper. En mer utförlig utvärdering av metodiken, än den praktiska tillämpningen, hade varit att jämföra uppskattad kapacitet för en byggnad med en genomförd skadeuppföljning. Om storlek på differenssättning och eventuell skada på en byggnad är dokumenterad kan uppvisad kapacitet för byggnaden jämföras med den förväntade kapaciteten enligt metodiken. En sådan jämförelse möjliggör att utvärdera om metodiken överskattar, alternativt underskattar risken för skada. Tyvärr har denna typ av jämförelse inte varit möjlig att genomföra under detta arbete.

6.3 Slutsats

Slutsatsen av arbetet är att det är möjligt att genom en generell metodik bedöma risken för skador på byggnader till följd av differenssättningar innan ett byggprojekt inleds. Föreslagen riskklassificering utförs genom att ett antal byggnadsegenskaper bedöms utifrån hur de påverkar byggnadens kapacitet. Metodikens generella bedömning medför både för- och nackdelar. En generell metod kan vara till hjälp i en inledande undersökning för att senare kompletteras med en detaljerad bedömning, exempelvis enskilda observationer av riskobjekt. En nackdel med en generell metod är att den grundas på en förenklad bild av verkligheten vilket medför ett mindre noggrant resultat. För att i framtiden utforma en standard krävs troligen fler undersökningar och fallstudier inom ämnet.

6.4 Idéer till fortsatt arbete

Under arbetets gång har frågor dykt upp som inte varit möjliga att besvara eller rymts inom tiden för detta examenarbete. Nedan beskrivs förslag till fortsatta uppslag inom ämnet riskklassificering vid en styrd grundvattensänkning:

- En utökad praktisk tillämpning av den föreslagna metodiken. Riskklassificering av ett större antal byggnader där en byggnads tillåtna lutning jämförs med förväntad lutning i aktuell lutningszon. Riskklassificeringen kan följas upp med en undersökning av uppkomna skador efter grundvattensänkningen.
- Hur stor påverkan har byggnadens längd vid den krökning som byggnaden utsätts för vid en differenssättning? I denna metodik har ett linjärt samband antagits mellan längd och bedömd kapacitet. Ett linjärt samband kan vara en förenkling på osäkra sidan vilket motiverar att längdens påverkan undersöks mer noggrant.
- Hur påverkar en byggnads höjd dess kapacitet att motstå skador? Kvoten mellan en byggnads längd och höjd kan vara en faktor som bör bedömas i en riskklassificering.

7 Referenser

- Andersson, A. & Holmstrand, O. m.fl. (1984) Infiltration och alternativa åtgärder vid grundvattensänkning. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Boscardin, M.D. & Cording, E.J. (1989) Building response to excavation – induced settlement. ASCE Journal of geotechnical engineering, v. 115, n. 1, s. 1 – 21 Jan 1989.
- Burland, J.B. & Wroth C.P. (1974) Settlement of buildings and associated damage. University Engineering Department, Cambridge.
- D'Appolonia, D.J. (1971) Effects of Foundation Construction on Nearby Structures, Pro., 4th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Vol. 1, pp. 189 – 236, 1971
- Fetter, C.W. (2001) Applied hydrogeology. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- Knutsson, G. & Morfeldt, C.-O. (2002) Grundvatten – teori & tillämpning. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm
- Larsson, R. (1989) Information 1 – Jords egenskaper. Statens geotekniska institut, Linköping
- MSB, Myndighet för samhällsskydd och beredskap (2014) Jordarternas bildningssätt 2010 <https://www.msb.se/sv/Forebyggande/Naturolyckor/Skred-ras-och-slamstrommar/Varfor-intraffar-skred-och-ras/Jordarternas-bildningssatt>
Hämtad 2015-10-07
- Möller, H. Geotekniker Tyréns AB (2015a) muntlig föreläsning 2015-03-23.
- Möller, H. Geotekniker Tyréns AB (2015b) Intervju 2015-10-01
- Möller, H. Geotekniker Geokonsult AB (2016) E-mail 2016-01-22
- Leca, E. & New, B. (2006) Settlements induced by tunneling in soft ground. Tunneling and underground space technology v. 22, n. 2, s. 119 – 149, Mars 2007
- Powers J. P. (1985) Dewatering – avoiding its unwanted side effects. American Society of Civil Engineers, New York, 1985.
- Preene, M. (2000) Assessment of settlements caused by groundwater control. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, v. 143, n. 4, s. 177 – 190, Oct 2000
- Preene, M. (2012) Groundwater Lowering in Construction – A Practical Guide to Dewatering, Second Edition. CRC Press, Boca Raton
- SFS (2004) Förordning (2004:660) om förvaltning av kvaliteten på vattenmiljön. Miljö- och energidepartementet, Stockholm
- SGU (2016a) Sveriges geologiska undersökning. Morän – spår av inlandsisen. <http://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/inlandsisen/moran-spar-av-inlandsisen/>
Hämtad 2016-01-19

SGU (2016b) Sveriges geologiska undersökning. Glaciala finkorniga sediment.
<http://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/isen-smalter/glaciala-finkorniga-sediment/>
Hämtad 2016-01-20

IEG (2011) IEG Rapport 12:2010 - SS-EN/ISO 14688-1 Geoteknisk undersökning och provning identifiering och klassificering av jord. Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik, Stockholm

Standardiseringen i Sverige (1999). SS025211 Vibration och stöt – Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spontning, schaktning och packning.

Swedish Standards Institute (2011). SS4604866:2011 Vibration och stöt – Riktvärde för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader, utgåva 3.

Sällfors, G. (2009) Geoteknik, jordmateriallära – jordmekanik, 4:e uppl. Göteborg.

Trafikverket (2014a) Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13. Trafikverket, Borlänge

Trafikverket (2014b) Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner TK Geo 13. Trafikverket, Borlänge