CHALMERS

VETENSKAPLIG RAPPORT

Kostnads-nyttoanalys av skyddsåtgärder för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande

Fallstudie Förbifart Stockholm

JOHANNA MERISALU
JONAS SUNDELL
LARS ROSÉN

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
Avdelningen för Geologi och geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020:12
www.chalmers.se

RAPPORT ACE 2020:12

Kostnads-nyttoanalys av skyddsåtgärder för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande

Fallstudie Förbifart Stockholm

Rapport

Samhällsbyggnadsteknik

JOHANNA MERISALU
JONAS SUNDELL
LARS ROSÉN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och geoteknik
Forskargruppen Teknisk geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2020

Kostnads-nyttoanalys av skyddsåtgärder för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande - Fallstudie Förbifart Stockholm

Rapport

Samhällsbyggnadsteknik

JOHANNA MERISALU, JONAS SUNDELL, LARS ROSÉN

© JOHANNA MERISALU, JONAS SUNDELL, LARS ROSÉN, 2020

Rapport ACE 2020:12

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2020

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Forskargruppen Teknisk geologi

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2020

Kostnads-nyttoanalys av skyddsåtgärder för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande- Fallstudie Förbifart Stockholm

Rapport

Samhällsbyggnadsteknik

JOHANNA MERISALU

JONAS SUNDELL

LARS ROSÉN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Forskargruppen Teknisk geologi

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Vid byggande under marknivå och under rådande grundvattenyta kan grundvatten läcka in i anläggningen. Eftersom arbeten i anläggningen samt driften av anläggningen måste utföras i torra miljöer måste inläckande grundvatten i sådana situationer ledas bort. Om sättningskänsliga jordar finns inom påverkansområdet riskerar grundvattenbortledning att orsaka marksättningar vilka i sin tur riskerar att skada byggnader och andra anläggningar. För att reducera risken för skada kan verksamhetsutövaren vidta skyddsåtgärder. Vid genomförande av åtgärder finns det två typer av risker: 1) att inte genomföra en åtgärd som borde genomföras med skador på omgivningen som följd, och 2) att genomföra en åtgärd som inte borde genomföras med onödiga kostnader som följd. För att minska dessa två risker krävs det att åtgärders kostnader och nyttor vägs mot varandra. Det övergripande syftet med denna rapport är att presentera och exemplifiera en probabilistisk kostnads-nyttoanalys av åtgärdsalternativ för hantering av hydrogeologiska risker i undermarksprojekt genom en fallstudie för projekt Förbifart Stockholm. Det övergripande syftet nås genom att de ekonomiska konsekvenserna av marksättning till följd av grundvattensänkning beräknas samt att identifierade kostnader och nyttor av olika åtgärdsalternativ relativt ett nollalternativ jämförs. Resultatet från kostnads-nyttoanalysen visar att nyttorna i form av minskad ekonomisk skaderisk är små (ca 70 miljoner) relativt kostnaderna för att genomföra de tätningsåtgärder som krävs för att efterleva de inläckagevillkor som anges i tillståndsdomen för projektet (flera miljarder). Kostnads-nyttoanalysen exemplifierar också nyttan i att använda sig utav en strukturerad modell för att utvärdera lönsamheten hos olika åtgärdsalternativ.

Nyckelord: undermarksbyggande, grundvattenbortledning, skyddsåtgärder, risk, kostnads-nyttoanalys, beslutsstöd

Cost-benefit analysis of safety measures for management of hydrogeological risks when constructing below ground - Case study Förbifart Stockholm

Report

Civil and Environmental Engineering

JOHANNA MERISALU

JONAS SUNDELL

LARS ROSÉN

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Geology and geotechnics

Research Group of Engineering geology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Groundwater leakage is common when constructing below the ground surface and below the groundwater table. The leakage must be pumped away since construction work in the facilities and the operation of the facilities needs dry conditions. In areas of soft soils, the groundwater diversion can subsequently result in land subsidence and damages to buildings and other facilities. The project owner can implement safety measures in order to reduce the damage risk. There are two types of risks associated with implementing measures: 1) the risk of not implementing a necessary measure resulting in environmental impacts and damages, and 2) to implement unnecessary measures resulting in unnecessary costs. Both these risks can be reduced by comparing measures costs and benefits. The overall aim of these report is to present and exemplify a probabilistic cost-and benefit analysis of safety measure alternatives for management of hydrogeological risks in underground project through a case study for the project Bypass Stockholm (Förbifart Stockholm). The overall aim is reached by economically valuating the consequences of the groundwater lowering induced subsidence and identifying the costs and benefits of different safety measure alternatives in comparison to a reference alternative. The result from the cost-benefit analysis indicate that the benefits in the form of reduced economic damage risk are small (around 70 million) compared to the costs for implementing the sealing measures needed to comply with the requirements for leakage stated in the permit for the project (several billions). The cost-benefit analysis also exemplifies the value of using a structured model for evaluating the profitability of different safety measure alternatives.

Key words: underground construction, groundwater diversion, safety measures, risk, cost-benefit analysis, decision support

Innehåll

SAMMANFATTNING I
ABSTRACT II
INNEHÅLL III
FÖRORD V

1 INLEDNING 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte och mål 2

2 METOD OCH GENOMFÖRANDE I FALLSTUDIE 3
2.1 Modellkedja 3
2.2 Kostnads-nyttoanalys 4
2.2.1 Diskontering 4
2.3 Expertbedömningar 5
2.4 Åtgärdsalternativ 6
2.5 Sättningsberäkningar 7
2.5.1 Jordlagermodell och vertikal spänning 7
2.5.2 Rådande grundvattenförhållanden och portryck 8
2.5.3 Förändrade grundvattennivåer och portryck 9
2.5.4 Förändrade portryck under pågående konsolidering 10
2.5.5 Beräkningsmodell 11
2.5.6 Dataunderlag 11
2.5.7 Datahantering 15
2.5.8 Spatial analys 17
2.5.9 Simulering av marksättning 17
2.6 Skadeobjekt 18
2.7 Sambandet mellan marksättningen storlek och risken för skada 19
2.7.1 Byggnader 19
2.7.2 Ledningar 20
2.7.3 Hårdgjorda ytor 21
2.8 Sambandet mellan skada och skadekostnad 22
2.8.1 Byggnader 22
2.8.2 Ledningar 22
2.8.3 Hårdgjorda ytor 24
2.9 Investeringskostnader 24
2.9.1 Inläckage 25
2.9.2 Kontraktskostnader 25
2.9.3 Extra tätningsinsatser 26
2.9.4 Förseningar 27
2.9.5 Infiltration 27
2.9.6 Grundförstärkning av byggnader 29

3 RESULTAT 30
3.1 Sättningsberäkningar 30
3.2 Kostnads-nyttoanalys 34
3.2.1 Kostnader 34
3.2.2 Nyttor 35
3.2.3 Nettonuvärde 36

4 DISKUSSION 38

5 SLUTSATSER 40

REFERENSER 41

APPENDIX 1 - PARAMETERVÄRDEN OCH OMRÅDESINDELNING 43

APPENDIX 2 – SKADEKOSTNADER OCH INVESTERINGSKOSTNADER 49

Förord

Den här rapporten utgör en del av ett forskningsprojekt som syftar till att utveckla en modell för beslutsstöd för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande. Forskningsprojektet finansieras av Trafikverket och Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo.

Författarna vill tacka Trafikverket och BeFo för finansieringen av projektet. Vi vill också tacka kontaktpersonerna på Trafikverket som bidragit med den data och de expertbedömningar som krävts för att genomföra arbetet. Särskilt tack till Ola Forssberg som varit drivande i projektet. Tack också till Golder, Sweco och Kretslopp och vatten för hjälpen med att tillhandahålla data, ge expertbedömningar och ge rådgivning under projektet, utan ert bidrag hade arbetet inte gått att genomföra.

Göteborg april 2020

Johanna Merisalu

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vid grundvattenbortledning för undermarkskonstruktioner riskerar ekonomiska, kulturella och miljömässiga värden att skadas. Exempel på skadeobjekt är grundvattenberoende ekosystem och anläggningar såsom brunnar, våtmarker, källor och vattendrag (Attanayake & Waterman, 2006; Kværner & Snilsberg, 2013), byggnader och anläggningar med grundvattenberoende grundläggning (Vatovec & Kelley, 2007), byggnader, ledningar och vägar som kan skadas genom sättningar i kompressionsbara jordar (Boone, 1996; Persson, 2007), samt skördebortfall (Graffner, 2007).

För att kunna bedöma risken för skada till följd av ett inläckage av grundvatten till en undermarkskonstruktion krävs det att hela händelsekedjan från inläckage till skada beaktas (Sundell m.fl., 2015). För skadeobjekt belägna på sättningskänsliga jordar beror magnituden på skadan på interaktionen mellan grundvattenbortledningens storlek, de hydrogeologiska förhållandena, de geotekniska förhållandena och känsligheten hos skadeobjektet (Sundell, 2018). Beroende på inläckagets storlek och varaktighet samt förhållandena i det hydrogeologiska systemet kan en grundvattensänkning ske i närliggande magasin. Hur stor påverkan blir beror på de hydrauliska egenskaperna hos både jord och berg tillsammans med systemets randvillkor och vattenbalans. Om magasinet överlagras av en lera kan en minskning av portrycket initieras vilket i sin tur kan leda till sättningar. Hur stora sättningarna blir beror av lerans belastningshistorik och dess kompressionsegenskaper. Sättningarna kan i sin tur ge upphov till skador på objekt såsom byggnader och ledningar.

För att reducera risken för skada kan verksamhetsutövaren vidta skyddsåtgärder. Dessa åtgärder kan riktas mot flera händelser i händelsekedjan. En vanlig och viktig åtgärd för att motverka inläckage till undermarksanläggningar är att utföra tätningsåtgärder (Panthi & Nilsen, 2005). Tätningsåtgärderna för berganläggningar utgörs vanligtvis av injektering eller betonginklädnad av tunnelns väggar, golv och tak (Stille, 2015). För att motverka grundvattensänkning och/eller bibehålla stabila grundvattennivåer kan konstgjord infiltration användas. Vatten kan infiltreras till jordlagren eller direkt till berget genom infiltrationsbrunnar (Andersson & Sellner, 2000; Ilsley m.fl., 1991). Åtgärder som syftar till att minska inläckage eller motverka grundvattensänkning syftar båda till att minska sannolikheten för att skada till följd av grundvattensänkningen sker. Åtgärder kan också riktas direkt mot skadeobjekten för att minska konsekvensen av en grundvattensänkning. Exempelvis kan sättningskänsliga byggnader grundförstärkas så att ingen skada kan uppstå vid eventuell marksättning.

Vid genomförande av åtgärder finns två typer av risker: 1) att inte genomföra en åtgärd som borde genomföras med skador på omgivningen som följd, och 2) att genomföra en åtgärd som inte borde genomföras med onödiga kostnader som följd. För att minska bägge dessa risker är det av stor vikt att åtgärders för- och nackdelar vägs mot varandra. Utifrån ett samhällsekonomiskt perspektiv kan detta lämpligen göras genom en

kostnads-nyttoanalys (KNA). KNA är en analys som innefattas av det bredare begreppet konsekvensanalys. Liksom konsekvensanalyser är kostnads-nyttoanalyser ett stöd för beslutsfattande. KNA bygger på en identifiering av de positiva och negativa konsekvenserna av ett projekt i samhället och syftar till att jämföra dessa konsekvenser med varandra för att se om de positiva konsekvenserna är större än de negativa eller tvärtom. Analysen görs genom att de positiva effekterna (marginalnyttan) och de negativa effekterna (marginalkostnaderna) värderas relativt ett referensalternativ. I en KNA uttrycks de olika konsekvenserna i monetära enheter i så stor utsträckning som möjligt. De effekter som inte kan uttryckas i pengar bör så långt möjligt beskrivas kvalitativt och bedömas i vilken grad de kan påverka slutsatserna från kostnads-nyttoanalysen. Kostnads-nyttoanalys som metod beskrivs i en mängd olika textböcker, vägledningar, vetenskapliga rapporter, artiklar och utredningar. Ett ofta refererat standardverk är Boardman m.fl. (2017). I Sverige beskrivs metoden av exempelvis Nordzell m.fl. (2017) och Trafikverket (2018).

I denna rapport presenteras en metod för kostnads-nyttoanalys av åtgärdsalternativ med tillämpning på Förbifarts Stockholms norra del. Förbifart Stockholm är ett vägprojekt som sträcker sig mellan Skärholmen i söder och Häggvik i norr. Projektet utgör en sträcka på 21 km varav 18 km utgörs av tunnel. Byggnation startades 2014 och öppnandet är planerat till 2030 (Trafikverket, 2011b). Metoden för kostnads-nyttoanalys baseras på en kombination av data och expertbedömningar för det hydrogeologiska systemetens förhållanden, de geotekniska förutsättningarna, skadeobjektens känslighet för grundvattensänkning, kostnader för att åtgärda skador samt kostnader för att genomföra åtgärder. Genom att kombinera en sättningsmodell, en skademodell och en kostnadsmodell kan åtgärdernas nyttor beräknas. Genom att beskriva kostnaderna för att genomföra åtgärderna kan nettonuvärdet av åtgärderna beräknas.

1.2 Syfte och mål

Det övergripande syftet med denna rapport är att genomföra en samhällsekonomisk analys av olika åtgärder för att minska risken för skador på byggnader och anläggningar från marksättningar som beror av grundvattenbortledning.

För att uppnå det övergripande syftet har projektet följande specifika målsättningar:

- Definiera relevanta åtgärdsalternativ och referensalternativ för projektet med syftet att motverka otillåtet inläckage, sänkta grundvattennivåer och/eller skador.
- Definiera samband mellan marksättning och skada.
- Definiera sambandet mellan skada och skadekostnad.
- Beräkna den samhällsekonomiska risken, som en funktion av sannolikheten för påverkan och skadekostnad, för sättningar inom påverkansområdet för tunneln för identifierade åtgärdsalternativ.
- Beräkna kostnaden för åtgärdsalternativen.
- Beräkna nyttorna i form av minskade skadekostnader för åtgärdsalternativen.
- Beräkna den samhällsekonomiska lönsamheten för åtgärdsalternativen.

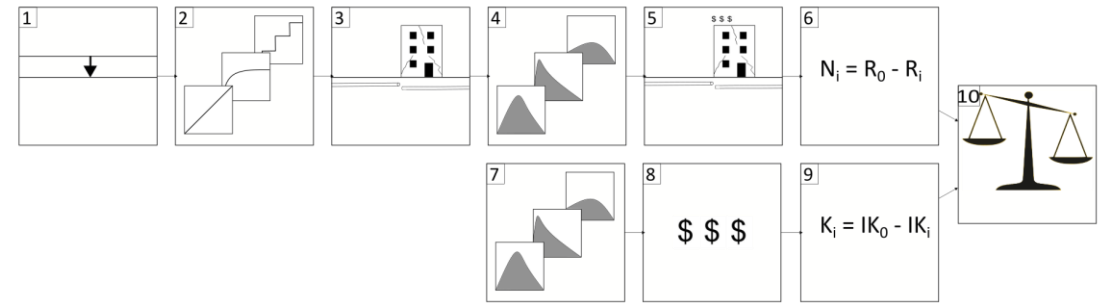
2 Metod och genomförande i fallstudie

2.1 Modellkedja

Kostnadsnyttoanalysen genomförs i flera steg (se Figur 1) med ett sannolikhetsbaserat (probabilistiskt) angreppssätt. Härvid representeras osäkerheter hos ingående variabler med sannolikhetsfördelningar. Därefter genomförs statistisk simulering (med Monte Carlo-metoden) för att generera ett stort antal lika sannolika resultatutfall (iterationer). Utifrån dessa iterationer kan dels osäkerheter för utfallen uppskattas, dels kan känslighetsanalyser utföras för att undersöka vilka ingående variabler som bidrar mest till resultatens osäkerhet. Detta är viktig information för att identifiera de insatser som bör prioriteras för att åstadkomma en analys med högre grad av tillförlitlighet om så önskas.

Först simuleras marksättningens storlek (1) genom att den förändrade effektivspänningen bestäms utifrån en uppskattad grundvattensänkning. Metoden för simulering av marksättning samt grundvattensänkningen beskrivs i avsnitt 2.5. Modeller för sambandet mellan marksättningens storlek och skaderisken beskrivs (2) och används därefter för att simulera risken för skada till följd av marksättningen (3). Modeller för risken för skada för skadeobjekten beskrivs i avsnitt 2.7. En skada ger upphov till skadekostnader då skadan måste åtgärdas. Sambandet mellan skada och skadekostnad beskrivs med kostnadsmodeller (4) och dessa används för att simulera den ekonomiska risken (5) av marksättningen. Kostnadsmodellerna beskrivs i avsnitt 2.8. Dessa steg genomförs för alla åtgärdsalternativ som ska utvärderas i analysen. Genom att jämföra skadekostnaderna för respektive åtgärdsalternativ relativt ett referensalternativ kan den minskade risken för varje åtgärdsalternativ, dvs den ekonomiska nyttan, beräknas (6).

Utifrån flera kostnadsmodeller (7) simuleras investeringskostnaden för åtgärden (8). Kostnadsmodellerna beskrivs i avsnitt 2.9. Kostnaden för åtgärdsalternativen bestäms på samma vis som nyttan genom att jämföra åtgärdsalternativens kostnader för investering, drift och underhåll jämförs med referensalternativets kostnader (9). Slutligen uppskattas den samhällsekonomiska lönsamheten (nettonuvärdet) av varje åtgärdsalternativ genom att nyttan subtraheras med kostnaden (10). Hela sekvensen upprepas 1000 gånger (iterationer) vilket resulterar i ett resultat som inkluderar osäkerheter. Alla dessa steg beskrivs i mer detalj i följande avsnitt.



Figur 1. Schema för de modeller som ingår i kostnads-nyttoanalysen.

2.2 Kostnads-nyttoanalys

Den ekonomiska risken av marksättning, R_i, kan beräknas genom att kombinera sannolikhetstäthetsfördelningarna av sättningen storlek, S_i med en funktion som beskriver kostnaderna för skadan till följd av olika grad av marksättning, K_i:

$$R_i = \int K_i \, S_i \, dS \tag{1}$$

Den ekonomiska risken beräknas över alla skadeobjekt för varje åtgärdsalternativ. För att jämföra den ekonomiska risken för de olika åtgärdsalternativen bestäms nyttan av åtgärdsalternativen, Ni, relativt ett nollalternativ:

$$N_i = R_0 - R_i \tag{2}$$

På samma sätt som nyttan av ett åtgärdsalternativ beräknas kan också investeringskostnaden för ett åtgärdsalternativ beräknas genom att kombinera sannolikhetstäthetsfördelningen att en investering i en åtgärd måste genomföras samt en funktion som beskriver kostnaden av att genomföra den åtgärden.

Matematiskt kan en kostnads-nyttoanalys uttryckas som en målfunktion som mäter skillnaden mellan nyttor och kostnader. För ett visst åtgärdsalternativ *i* kan målfunktionen formuleras som:

$$NNV_i = \sum_{t=0}^{T} \frac{(N_t - K_t)}{(1+r)^t} \tag{3}$$

NNV_i = nettonuvärdet, vilket utgör nuvärdet av nettonyttan (dvs. nyttor minus kostnader) av att genomföra åtgärdsalternativet *i*, T = tidshorisont angivet i antal år *t*, N_t = nyttor av att genomföra åtgärdsalternativet *i* under år t, K_t = kostnader för att genomföra åtgärdsalternativet *i* under år *t*, och *r* = diskonteringsränta.

Som framgår av ekvationen för KNA beräknas ett nuvärde för alla kostnader respektive nyttor under den aktuella tidshorisonten. Detta sker genom en omräkning med hjälp av en räntesats och görs för att ta hänsyn till att nyttor och kostnader inträffar vid skilda tidpunkter och därför inte kan jämföras direkt med varandra. Valet av räntesats för diskontering beskrivs närmare i avsnitt 2.2.1.

Om värdet på målfunktionen, dvs. nettonuvärdet, är positivt är alternativet samhällsekonomiskt lönsamt, och ju högre positivt värde desto mera lönsamt är alternativet. Alternativen värderas relativt ett referensalternativ, dvs kostnader och nyttor representerar negativa respektive positiva *förändringar* jämfört med referensalternativet. Detta referensalternativ definieras ofta som att inte vidta någon åtgärd alls och de konsekvenser som detta leder till. Rent principiellt finns dock inga hinder att använda andra definitioner på referensalternativet.

2.2.1 Diskontering

Diskontering är ett begrepp som används vid alla samhällsekonomiska beräkningar. Det innebär en omräkning med hjälp av en räntesats för att ta hänsyn till att nyttor och kostnader inträffar vid skilda tidpunkter och därför inte kan jämföras direkt med varandra. En diskonteringsränta används för att räkna om alla nyttor och kostnader i

kostnads-nyttoanalysen till ett nuvärde. Inom ramen för detta projekt finns både kostnader och nyttor som inte sker direkt utan i framtiden. Exempelvis måste infiltrationsanläggningar hållas igång under hela anläggningens livslängd vilket innebär en återkommande årlig kostnad.

För samhällsekonomiska kalkyler inom transportområdet rekommenderar exempelvis Trafikverket (2018) en räntesats på 3,5 %. Denna räntesats baseras på studier av marknadsräntor och produktiviteten i samhället. I den s.k. Stern-rapporten rekommenderas en lägre räntesats på 1,4 % för samhällsekonomiska kalkyler rörande klimateffekter och åtgärder mot klimatförändringar. Låga, och ibland fallande räntesatser över tid, rekommenderas när exempelvis moraletiska aspekter om framtida generationer vägs in eller när stora osäkerheter om framtida förhållanden råder.

Valet av diskonteringsränta kan påtagligt påverka utfallet i en kostnads-nyttoanalys, såväl vad gäller nettonuvärdets absoluta storlek, men i vissa fall också rangordningen av alternativ. Vilken räntesats som väljs grundas i vilken grundläggande syn som beslutsfattandet utgår ifrån. Valet gällande vilken diskonteringsränta som borde användas vid denna typ av analys ligger utanför syftet med denna rapport. Kostnads-nyttoanalysen har därför genomförts med tre olika diskonteringsräntor, 0 %, 1,4 % och 3,5 %. På så vis kan beslutsfattarna jämföra utfallet med olika räntesatser och därigenom fatta ett välgrundat beslut gällande val av åtgärds. Tidshorisonten har satts till 120 år vilket motsvarar den förväntade livslängden av anläggningen.

2.3 Expertbedömningar

Flera av de ingående variabler som krävs för att uppskatta kostnaderna och nyttorna av olika åtgärdsalternativ har bestämts med hjälp av s.k. expertelicitering. Experterna har deltagit i arbetet med att beskriva projektet, ta fram relevanta åtgärdsalternativ, bedöma inläckage och grundvattensänkningar för åtgärdsalternativen, beskriva samband mellan marksättning, skada och skadekostnad samt ge uppskattningar på mängd och kostnader för skyddsåtgärder samt kontrakts- och förseningskostnader. Syftet med expertelicitering är att erhålla expertens kunskap om en osäker parameters kvantitet. Vanligtvis beskrivs kvantiteten med en sannolikhetstätshetsfunktion (PDF) vilken kan användas i en sannolikhetsbaserad riskanalys och kostnads-nyttoanalys (O'Hagan m.fl., 2006). För de parametrarna som bedömts med expertelicitering har en Beta PERT-fördelning använts. PERT-fördelningen är en effektiv och flexibel fördelning vid expertbedömningar (Malcolm m.fl., 1959). Fördelningen beskrivs genom att ett mest troligt värde uppskattas tillsammans med en minsta och högsta möjliga värde. I en PERT-fördelning ges det mest troliga värdet fyra gånger så stor vikt som det minsta eller det högsta värdet. Att stor vikt ges till det mest troliga värdet är fördelaktigt vid expertbedömningar då det generellt är lättare att bedöma ett mest troligt värde än extremvärden (Salling, 2007). Totalt har nio personer bidragit med sin kunskap. Flera av dessa är involverade i projekt Förbifart Stockholm som projektledare, hydrogeologer och geotekniker. Konsulter utan direkt koppling till projekt Förbifart har också involverats för deras kunskap inom grundförstärkning och skador på ledningsnät.

2.4 Åtgärdsalternativ

Åtgärdsalternativen som undersökts i projektet har utgått från villkoret för tillåtet inläckage (MMD M11838-14) samt verksamhetsutövarens strävan att undvika att grundvattennivåerna påverkas på ett sådant sätt att skada uppkommer i omgivningen. Åtgärdsalternativen utgår också från vilka skyddsåtgärder som anses vara relevanta för projektet att genomföra. Åtgärdsalternativen har tagits fram av expertgruppen. En sammanställning av åtgärdsalternativens utformning samt hur väl de uppfyller tillståndets villkor och hur väl de motverkar skada ges i Tabell 1.

Referensalternativet: Alt0

Åtgärdsalternativ 0 är det referensalternativ som alla andra åtgärdsalternativ jämförs mot. Referensalternativet utgörs av den injekteringsdesign som uppgavs i bygghandlingen för berörda delsträckor. För detta alternativ så infiltreras inget vatten för att bibehålla stabila grundvattennivåer. Detta åtgärdsalternativ klarar inte inläckagevillkoren eftersom tätningen bedöms resultera i större inläckage än de tillåtna mängderna. Detta alternativ orsakar också skadlig omgivningspåverkan eftersom inläckagets storlek bedöms resultera i betydande grundvattensänkning i områden med sättningskänsliga byggnader och/eller anläggningar.

Alternativ 1 (Alt1)

För detta alternativ tätas berget tills mängden inläckande vatten motsvarar den tillåtna mängden i tillståndsdomen. För att klara inläckagevillkoren har expertgruppen bedömt att det krävs ett nytt (jämfört med Alt 0) robustare tätningskoncept. Ingen infiltration är inkluderad i detta alternativ. Detta åtgärdsalternativ bedöms klara inläckagevillkoren men eftersom inget vatten infiltreras finns risk för skadlig omgivningspåverkan.

Alternativ 2 (Alt2)

Detta alternativ utgörs av injekteringsdesign enligt bygghandling precis som Alt0. För detta alternativ ingår också konstgjord infiltration för att bibehålla stabila grundvattennivåer. Tätningsdesignen bedöms inte vara tillräcklig för att efterleva inläckagevillkoren från tillståndsdomen. Eftersom det infiltreras vatten bedöms alternativet inte medföra någon omgivningspåverkan vilket innebär att ingen skada kan uppstå.

Alternativ 3 (Alt3)

Tätningsdesignen för detta alternativ är samma injekteringskoncept som för Alt2 men med extra tätningsinsatser i form av betonginklädnad på de sträckor som bedöms som extra vattengenomsläppliga. För detta alternativ ingår också konstgjord infiltration för att bibehålla stabila grundvattennivåer. Berget tätas tills att inläckagemängder motsvarar högsta tillåtna värde för inläckage enligt tillståndsdomen. Alternativet efterlever således inläckagevillkoren. Eftersom konstgjord infiltration används bedöms ingen omgivningspåverkan uppstå.

Alternativ 4 (Alt4)

Detta alternativ utgörs av injekteringsdesign enligt bygghandlingen liknande den för Alt0 och Alt 2 samt grundförstärkning av de byggnader som innan tunneldrivningen startats har bedömts vara sättningskänsliga. För att identifiera byggnaderna som preventivt bör grundförstärkas genomfördes sättningsberäkningar för alla byggnader med sättningskänslig grundläggning inom påverkansområdet för tunneln. De byggnader som var belägna på lera och där minst 5 % av de statistiska simuleringarna fick sättningsbelopp >1 cm uppfyller kriteriet för att grundförstärkas innan arbetet med tunneln påbörjas. Detta åtgärdsalternativ klarar inte inläckagevillkoren och skadlig omgivningspåverkan uppstår till följd av inläckaget. Skadlig påverkan på byggnader undviks dock.

Tabell 1. Sammanställning av åtgärdsalteranativens utformning samt hur väl de uppfyller villkoren i tillståndet.

	Åtgärdsalternativ	0	1	2	3	4
Tätning enligt	Bygghandling	x		x		x
	Villkor		x		x	
Infiltration	Ingen	x	x			
	Fullständig			x	x	
Förstärkning	Byggnader					x
Inläckagevillkor efterlevs			x		x	
Ingen skadlig omgivningspåverkan				x	x	x*

* Ingen skada på byggnader

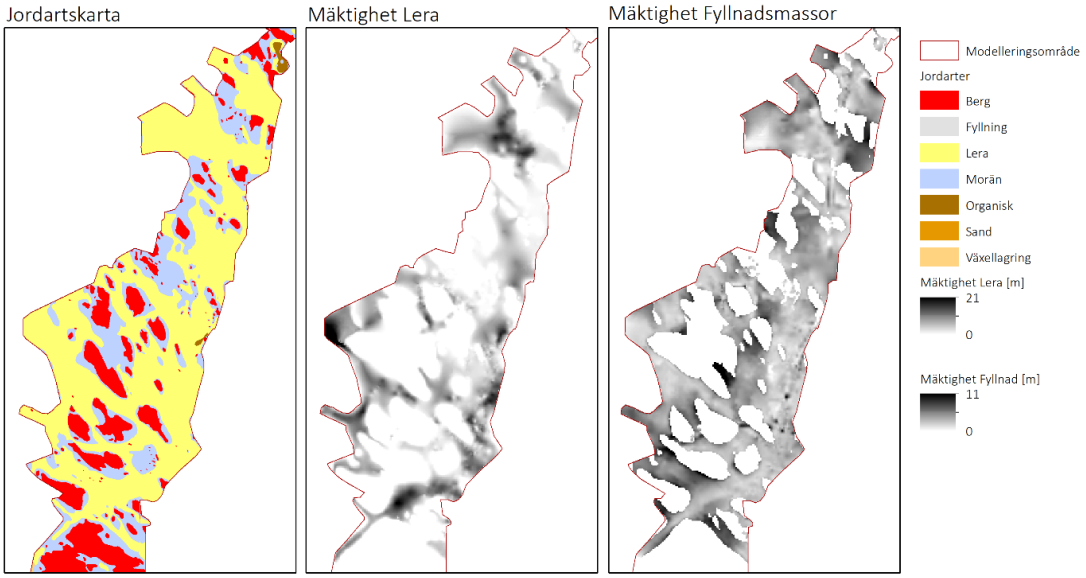
2.5 Sättningsberäkningar

Detta avsnitt beskriver metoden för den probabilistiska sättningsmodellen. I modellen ingår en jordlagermodell, en grundvattenavsänkningsmodell, beräkning av portryck och effektivspänning, modellen för sättningsberäkningen samt datahantering och en statisk analys av lerans kompressionsegenskaper. Modellen har använts för att simulera marksättningen som sker till följd av grundvattenavsänkningen för de olika åtgärdsalternativen. Koordinatsystemet som används i rapporten är SWEREF 99 TM.

2.5.1 Jordlagermodell och vertikal spänning

Jordlagermodellen som använts för sättningsberäkningarna har en förenklad jordlagerföljd med tre lager. Det översta lagret består av fyllnadsjord/grovkornig jord (i första hand svallsand) samt lerans torrskorpa, därunder ett lager med sättningskänslig lera och under detta ett lager med grovkornig jord (morän eller glacifluviala avlagringar). Modellen bygger på data från genomförda sonderingar i området tillsammans med karterade berghällar. Jordlagermodellen har inte genomförts inom ramen för detta projektet utan är en produkt från de geotekniska utredningar som utfördes inför byggstart av Förbifart Stockholm (Trafikverket, 2013). Upplösningen (cellstorleken) i jordlagermodellen är 10x10 meter. I Figur 2 visas en jordartskarta tillsammans med jordlagermodellen för lerans och fyllnadsmaterialet mäktighet.

Den totala vertikala spänningen (σ) beräknas för varje cell i jordlagermodellen i varje iteration utifrån lerans mäktighet och densitet samt fyllnadsmaterialets mäktighet och densitet. Ytlaster från till exempel byggnader eller andra anläggningar har inte inkluderats i beräkningen av den vertikala spänningen. För varje beräkningspunkt skapas en vertikal vektor med en upplösning på 0,1 meter för beräkning av σ.

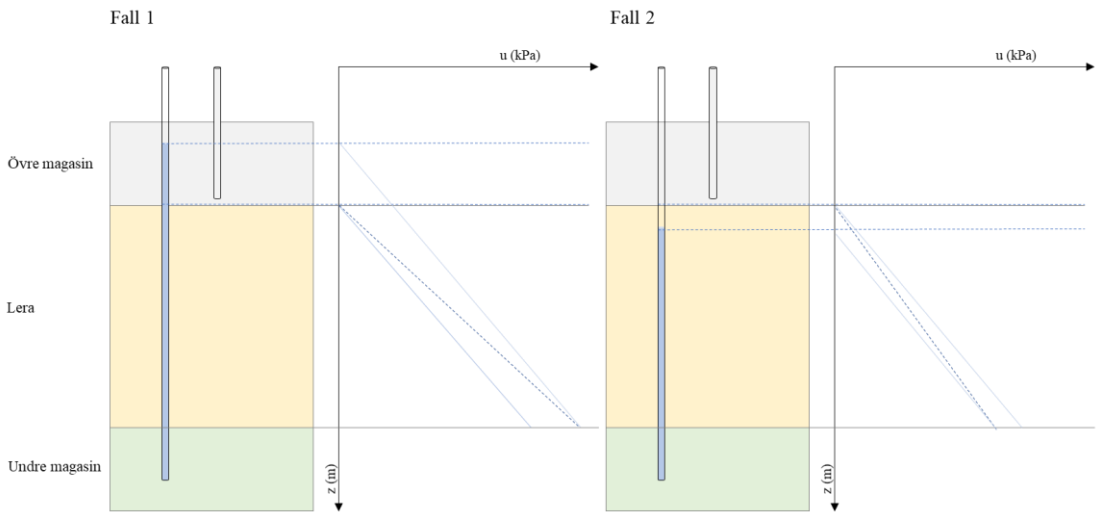


Figur 2. Jordartskartan, lerans mäktighet samt fyllnadsmaterialet eller annan grovkornig jords mäktighet.

2.5.2 Rådande grundvattenförhållanden och portryck

De naturliga opåverkade grundvattennivåerna för området beräknades utifrån grundvattenobservationer före byggstarten 2015. Grundvattenobservationerna består av mätserier från 91 observationsrör. Den naturliga opåverkade grundvattennivån ansattes som medelvärdet av mätserierna i respektive rör. För sättningsberäkningarna antas grundvattennivån i det övre magasinet vara lika med lerans överkant. Grundvattennivåerna gäller alltså endast för det undre magasinet. De punktvisa grundvattenobservationerna har interpolerats för att möjliggöra sättningsanalysen för alla punkter i modellen. Interpoleringsmetoden som använts är IDW (inverse distance weighting) med ”barriärer”. Barriärerna utgörs av alla områden med berg i dagen.

Utifrån de rådande grundvattenförhållandena kan portrycket (u) i leran beräknas. Det finns två fall av den rådande portrycksprofilen (Figur 3). För fall 1 överstiger grundvattennivån i det undre magasinet lerans överkant och i fall 2 understiger grundvattennivån i det undre magasinet lerans överkant. Från den vertikala spänningen (σ) och portrycket (u) kan den rådande vertikala effektivspänningen (σ'_v) beräknas.

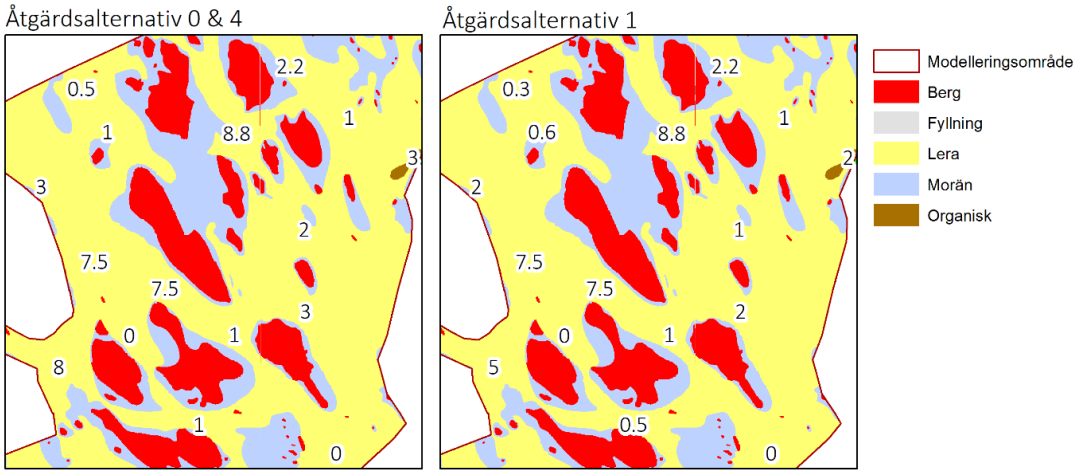


Figur 3. Beräkning av portryck i leran. Till vänster portrycket för fall 1 och till höger portrycket för fall 2. Det tjockare strecket utgör portrycksprofilen.

2.5.3 Förändrade grundvattennivåer och portryck

De förändrade grundvattenförhållandena för de olika åtgärdsalternativen har bedömts genom expertelicitering. Trafikverkets hydrogeologer som arbetar inom projektet Förbifart Stockholm och som har kännedom om de hydrogeologiska förhållandena för området har tillsammans bedömt avsänkningen för de olika åtgärdsalternativen. Det är endast åtgärdsalternativ 0, 1 och 4 som har avsänkning eftersom infiltration har bedömts kunna motverka grundvattensänkningen för åtgärdsalternativ 2 och 3. Avsänkningen är också densamma för åtgärdsalternativ 0 och 4. Sammanfattningsvis innebär detta att två olika scenarier för grundvattensänkning har bedömts, ett för den mängd inläckage som följer av att täta enligt bygghandlingen och en för den mängd inläckage som tillåts enligt tillståndsdomen.

Bedömningarna för avsänkningens storlek gjordes i två steg. Först bedömdes inläckagets storlek för de två tätningsdesignerna. Metoden för inläckagebedömningarna redovisas i avsnitt 2.9.1. I nästa steg bedömdes avsänkningen storlek för de två åtgärdsalternativen. Bedömningarna gjordes för alla avrinningsområden inom påverkansområdet. Som underlag för bedömningarna användes grundvattenobservationer inom och utom påverkansområdet, tidigare hydrogeologiska utredningar samt inläckagemätningar. Exempel på bedömd avsänkning för ett delområde visas i Figur 4. Utifrån bedömningarna skapades 49 punkter innanför och 22 punkter utanför påverkansområdet. Dessa punkter interpolerades sedan för att möjliggöra sättningsanalysen för alla punkter i jordmodellen. Interpoleringsmetoden som använts är IDW (inverse distance weighting) med barriärer. Barriärerna utgörs av alla områden med berg i dagen. För att ta hänsyn till osäkerheter bedömdes det nödvändigt att ansätta den bedömda avsänkningen med en felmarginal på ±20 %.



Figur 4. Exempel på bedömd avsänkning för åtgärdsalternativ 0 och 4 (till vänster) samt åtgärdsalternativ 1 (till höger) för en del av modelleringsområdet. Värdena representerar avsänkningens storlek och uttrycks i enheten meter.

De förändrade portrycksförhållandena till följd av de påverkade grundvattennivåerna vid fullständig konsolidering beräknas utifrån de interpolerade avsänkta grundvattennivåerna. De förändrade portrycksnivåerna beräknas utifrån samma modell (fall 1 och 2) som de rådande förhållandena. Från den nya portrycksprofilen (u_1) och den rådande porrtycksprofilen (u_0) kan skillnaden (Δu) beräknas. Δu ger upphov till en förändrad effektivspänning ($\Delta\sigma$) som ger upphov till en marksättning.

2.5.4 Förändrade portryck under pågående konsolidering

Vid en grundvattensänkning sker inte portrycksförändringen i leran omedelbart utan den låga hydrauliska konduktiviteten i leran ger upphov till en tidfördröjning. Förändrat portryck efter en viss tid (t) kan beräknas baserat på portrycket efter fullständig konsolidering samt medelkonsolideringsgraden. Medelkonsolideringsgraden efter en viss tid beräknas genom konsolideringskoefficienten (C_v) och tidsfaktor (T_v) för vektorn i varje simuleringspunkt enligt följande:

$$c_v = \frac{k\, M_L}{\gamma} \tag{4}$$

och

$$T_v = c_v \frac{t}{\mathrm{H}^2} \tag{5}$$

Där k är lerans hydrauliska konduktivitet (m/s), M_L är modulen $\mathrm{M_L}$ (kPa), γ är tungheten för vatten (kN/m³), t är vald tidpunkt efter att dräneringen av leran påbörjats till följd av grundvattenpåverkan (s) och H är dräneringsvägens längd, här vald till halva lermäktigheten då grundvattenpåverkan antas i både lagret över och under leran (m).

Från dessa ekvationer kan det förändrade portrycket efter en viss tid beräknas med Fourier-serier där konsolideringskoefficienter (U_z) beräknas enligt följande (Taylor, 1948):

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M}\left(\sin\frac{M \cdot z}{H}\right) e^{-M^2 T_v}\,, \tag{6}$$

I denna ekvation är z djupet under lerans överkant och M är:

$$M = \frac{1}{2}\pi\left(2\left(\frac{n-1}{2}\right)+1\right) \tag{7}$$

där n är ett heltal vars första värde är 1 och där ett tillräckligt stort antal värden måste väljas för att beräkningen ska bli rimlig.

Från U_z, portrycksförändringen (Δu) och portrycket efter fullständig konsolidering (u_1) kan portrycket efter en viss tid (u_t) beräknas. Utifrån u_t kan vidare den rådande vertikala effektivspänningen efter en viss tid ($\sigma'_v(t)$) beräknas.

$$u_t = (\Delta u \cdot U_z) + u_1 \tag{8}$$

2.5.5 Beräkningsmodell

Sättningsbeloppet i varje cell beräknas med en endimensionell elasto-plastisk kompressionsmodell (Larsson & Sällfors, 1981). Tre styvhetsfall med olika kompressionsmoduler som en funktion av effektivspänningen utvärderas i modellen (Tabell 2). Vilket fall som väljs beror av hur den vertikala effektivspänningen ($\sigma'v$) och förändringen i effektivspänning ($\Delta\sigma$) förhåller sig till förkonsolideringstrycket ($\sigma'c$), samt gränsspänningen (σ'_L). Ekvation 4 används för att integrera lösningarna för ekvation 1–3 utmed vektorn i varje beräkningspunkt.

Tabell 2. Ekvationer för beräkning av sättning där M_0 är modulen för spänningstillstånd under förkonsolideringstrycket (σ'_c), M_L är modulen för spänningstillstånd ovan förkonsolideringstrycket (σ'_c) och under gränsspänningen (σ'_L), och M' är kompressionsmodultalet.

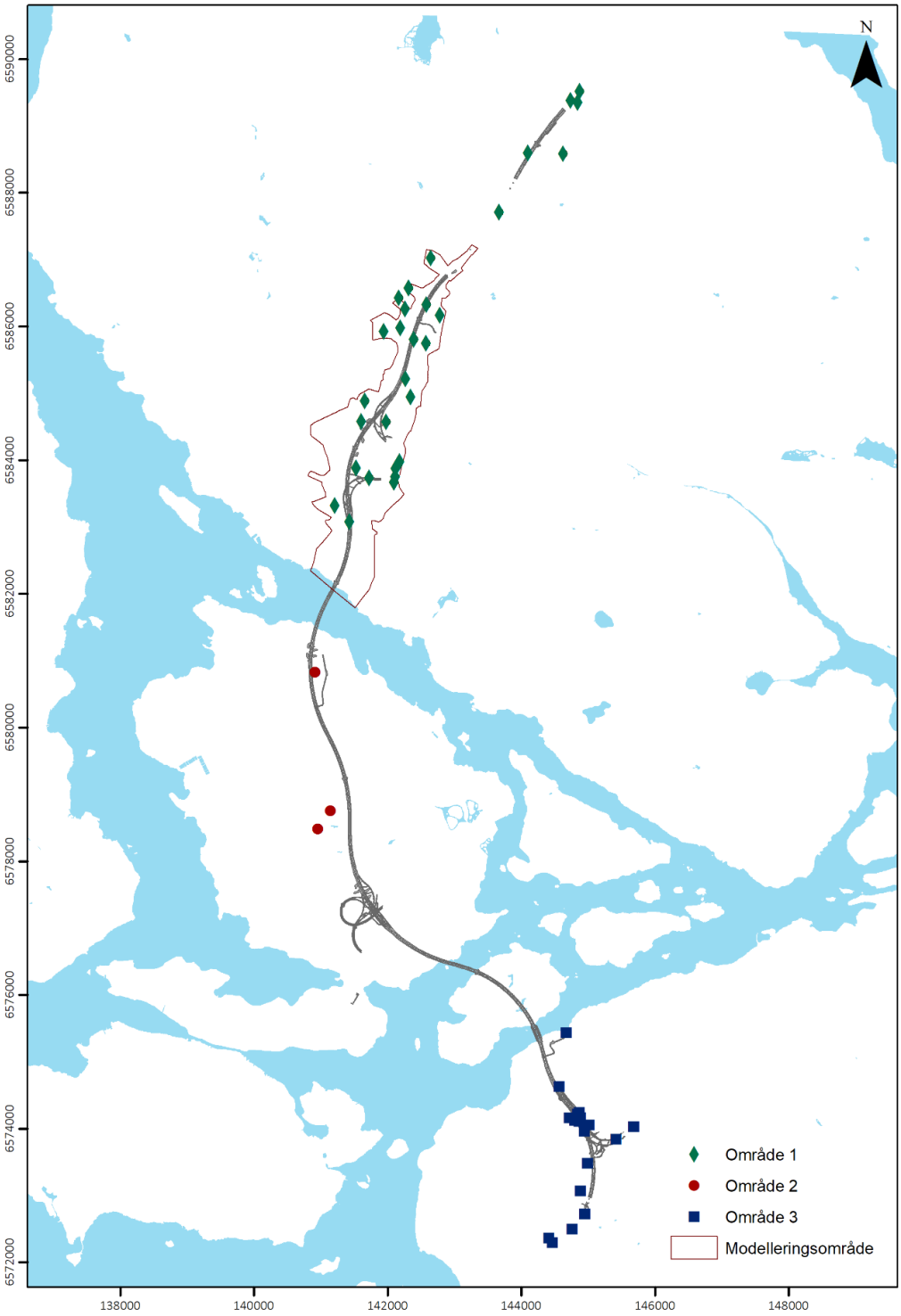
	Fall	Ekv.
Ekv. I	$\sigma'_v + \Delta\sigma < \sigma'_c$	$\delta(z) = \frac{\Delta\sigma}{M_0}$
Ekv. II	$\sigma'_c < \sigma'_v + \Delta\sigma < \sigma'_L$	$\delta(z) = \left(\frac{\sigma'_c-\sigma'_v}{M_0} + \frac{\sigma'_v+\Delta\sigma-\sigma'_c}{M_L}\right)$
Ekv. III	$\sigma'_v + \Delta\sigma > \sigma'_L$	$\delta(z) = \left(\frac{\sigma'_c-\sigma'_v}{M_0} + \frac{\sigma'_L-\sigma'_c}{M_L} + \frac{1}{M'} ln\left(1 + (\sigma'_v + \Delta\sigma - \sigma'_L)\frac{M'}{M_L}\right)\right)$
Ekv. IV	-	$s = \int_0^{z_{max}} \delta(z)dz$

För att möjliggöra en analys av när sättningen når en viss storlek utförs sättningsberäkningarna för fem tidpunkter efter initierad grundvattensänkning: 1, 2, 4, 15, 40 år. Utifrån dessa beräkningar skapas en funktion *t(s)* där tidpunkten i år efter initierad grundvattensänkning är en funktion av sättningens storlek. Funktionen är en linjär interpolation mellan de fem valda tidpunkterna.

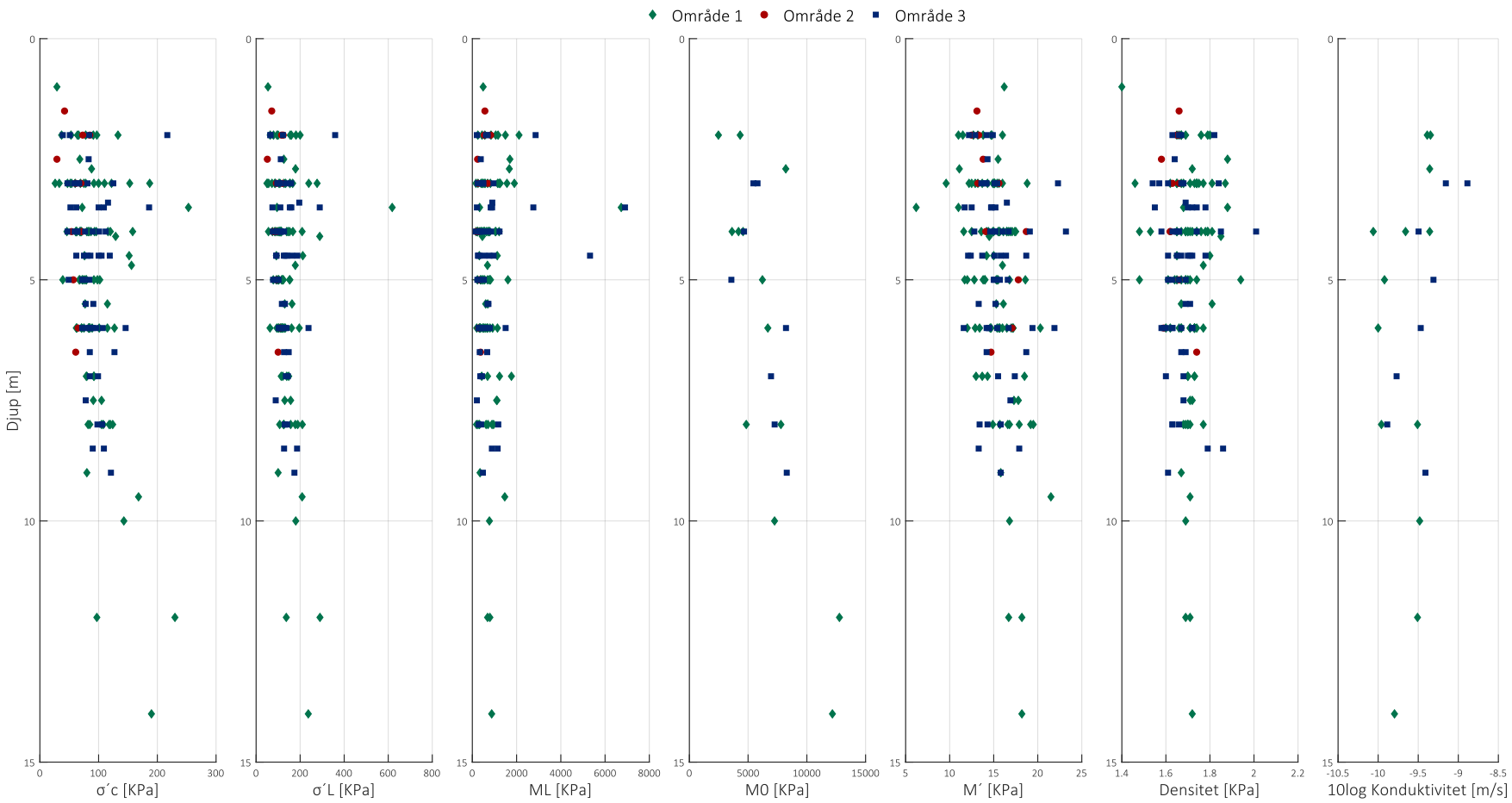
2.5.6 Dataunderlag

Ingående data för sättningsberäkningarna består av 50 provtagningspunkter med 164 unika prov (se Figur 5, Figur 6 och i Appendix 1). Parametervärdena från proverna har hämtats från de geotekniska utredningar som utfördes inför byggstart av Förbifart Stockholm. Proverna är tagna längst hela sträckan för tunnelanläggningen. Provtagningspunkterna har delats in i tre grupper utifrån vilket område längst tunnelns

sträckning de insamlats ifrån. Område 1 utgörs av tunnelns norra del och är därmed insamlade inom det modellerade området. Område 2 utgörs av Lovön och område 3 utgörs av tunnelns södra del. Båda dessa områden ligger utanför det modellerade området. För att utvärdera om det finns skillnader mellan dessa områden och om data från område 2 och 3 är representativ för modelleringsområdet, område 1, har ANOVA använts (se avsnitt 2.5.7).



Figur 5. Provtagningsplatser för utvärderade kompressionsförsök.



Figur 6. Parametervärden plottade mot djupet under markytan. Område 1 representeras av gröna diamanter, område 2 av röda cirklar och område 3 av blå kvadrater.

2.5.7 Datahantering

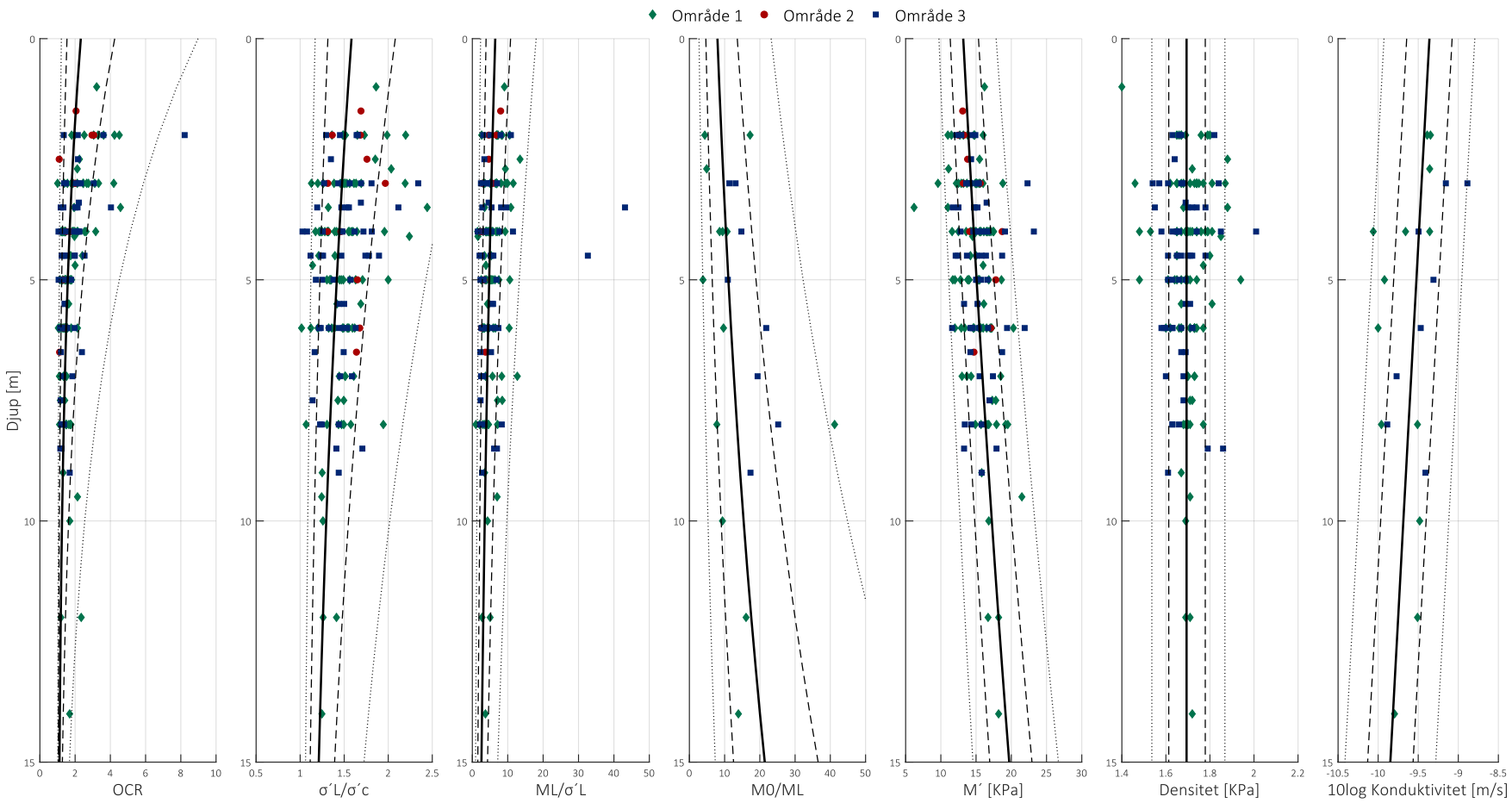
Innan sannolikhetstätshetsfunktionerna (PDFs) konstrueras måste de ingående variablernas beroende eller oberoende av varandra undersökas. Metoden för att undersöka samt hantera beroenden mellan parametrar presenteras i Sundell m.fl. (2017). Metoden kan sammanfattas som följer. Först undersöks beroenden mellan parametrar. Om parametrarna är beroende används kvoten mellan parametrarna för att undvika inkonsekventa värden i simuleringarna. Följande kvoter har använts i denna rapport: σ'_c / σ'_v, σ'_L / σ'_c, M_L / σ'_L och M_0 / M_L. Då effektivspänningen σ'_v inte kan vara större än förkonsolideringstrycket σ'_c måste kvoten $\sigma'_c / \sigma'_v > 1$. Kvoten subtraheras därför med 1 för att säkerställa att $\sigma'_c > \sigma'_v$. Utöver detta introduceras kriteriet $\sigma'_L > \sigma'_c$. Kvoten σ'_L / σ'_c subtraheras därför också med 1 för att säkerställa att $\sigma'_L > \sigma'_c$. Den hydrauliska konduktiviteten (k) och densiteten (ρ) för lera och fyllnadsmaterial antas i denna rapport oberoende från övriga parametrar. Om parametern eller kvoten är normalfördelad bestämts medelvärde (μ) och standardavvikelse (σ), annars transformeras data genom den naturliga logaritmen till normalfördelade värden.

I ett nästa steg undersöks eventuella vertikala trender med linjär regression. En determinationskoefficient (R^2) nära noll indikerar avsaknad av vertikal trend. Ett värde på R^2 större än 0,05 antas indikera en vertikal trend eftersom djupet få förklarar mer än fem procent av variabiliteten för denna parameter. Om R^2 beaktas bestäms medelvärde (μ) och standardavvikelse (σ) utifrån regressionslinjens residualer för att säkerställa att variansen är lika på varje vertikalt intervall utmed djupet.

Sannolikhetsfördelningarna samt regressionskoefficienterna framgår av Tabell 3. Det är endast densitet som inte har en signifikant trend mot djupet (R^2 = 0,0019). Densiteten har endast transformerats genom den naturliga logaritmen. Resterande parametrar har alla en signifikant trend mot djupet så för alla dessa parametrar har residualerna längs regressionslinjen använts och regressionskoefficienter har bestämts. Sannolikhetsfördelningarna för transformerade och logaritmerade data redovisas i Figur 7.

Tabell 3. Determinationskoefficienter, PDFs (normalfördelning) och regressionskoefficienter för parametrar och kvoter för simulering av marksättning.

Parameter	R^2	PDF		Regressionskoefficienter	
		μ	σ	a	b
ln M´	0,13	0,00	0,15	0,03	2,58
ln(OCR-1)	0,13	0,00	0,90	-0,16	0,27
$\ln(\sigma'_L/\sigma'_c-1)$	0,05	0,00	0,62	-0,07	0,54
$\ln(M_L/\sigma'_L)$	0,06	0,00	0,51	-0,06	1,87
$\ln(M_0/M_L)$	0,14	0,00	0,54	0,07	2,08
ln(Densitet)	0,00	0,53	0,05		
log10(k)	0,13	0,00	0,28	-0,03	-9,36



Figur 7. Parametervärden och faktorer som används för att beakta beroenden mellan parametervärden plottade mot djupet under markytan. Område 1 representeras av gröna diamanter, område 2 av röda cirklar och område 3 av blå kvadrater den solida linjen representerar medelvärdet för de prover som inte kan uteslutas från område 1. De streckade linjerna visar en standardavvikelse samt två standardavvikelser (95-procents intervall) för framtida observationer för område 1.

2.5.8 Spatial analys

För att undersöka rumsliga skillnader mellan grupper har en variansanalys (ANOVA) genomförts enligt metoden som presenteras i Sundell m.fl. (2017). Enligt samma studie kan rumsliga skillnader också beskrivas med en variogramsanalys. En analys av lerprover från Veda i östra Sverige visar horisontella korrelationer på upp till 30 meter (Müller m.fl., 2014). Eftersom det i huvudsak är stora avstånd (>100 meter) mellan provpunkterna i detta projekt kan det antas att variogrammens korrelationslängd inte uppnås på dessa avstånd. De rumsliga skillnaderna har därför endast undersökts med ANOVA. Nollhypotesen, att grupperna har samma medelvärde, förkastas eller förkastas inte vid variansanalysen med en signifikansnivå på 5%. Om det finns skillnader mellan de olika grupperna genomförs Bonferroni-metoden som ett post-hoc test för att påvisa vilken av grupperna som bör uteslutas. Om data utesluts bestäms nya PDFs och regressionskoefficienter baserat på resterande data.

Resultatet från variansanalysen visas i Tabell 4. För parametern densitet förkastas nollhypotesen att alla grupper har samma medelvärde. I detta fall utesluts proverna från område 2. För kvoten M_0/M_L utförs endast ett t-test för område 1 och 3 eftersom ingen data för M_0 finns från område 2. För resterande parametrar utesluts inget område utan all data tillgänglig används för sannolikhetsfördelningarna.

Tabell 4. Resultat av variansanalysen. Kolumn två och tre visar p-värdet för hypotesen att skillnaden i medelvärde för de två grupperna är lika med noll.

Parameter	ANOVA 1–2	ANOVA 1–3	Kommentar
ln(OCR-1)	0,96	0,57	Inget område kan uteslutas
$\ln(\sigma'_L/\sigma'_c-1)$	0,35	0,78	Inget område kan uteslutas
$\ln(M_L/\sigma'_L)$	0,31	0,41	Inget område kan uteslutas
$\ln(M_0/M_L)$	-	0,90	Inget område kan uteslutas
ln M´	0,98	0,73	Inget område kan uteslutas
ln(Densitet)	0,04	0,14	Område 2 kan uteslutas
log10(k)	-	0,11	Inget område kan uteslutas

2.5.9 Simulering av marksättning

Från jordlagermodellen samt den ursprungliga grundvattennivån bestäms u och σ'_v utmed den vertikala vektorn med upplösningen 0,1 meter. Överkonsolideringsgraden (*OCR*) simuleras från sannolikhetsfunktionen. σ'_c bestäms genom att multiplicera σ'_v med *OCR*. På samma sätt bestäms σ'_L genom att multiplicera σ'_c med sannolikhetsfördelningen för kvoten σ'_L/σ'_c. M_L bestäms på samma sätt genom att multiplicera σ'_L med sannolikhetsfördelningen för kvoten M_L/σ'_L. M_0 bestäms på samma sätt genom att multiplicera M_L med kvoten för M_0/M_L. För de resterande oberoende parametrarna simuleras värdena direkt från sannolikhetsfördelningarna.

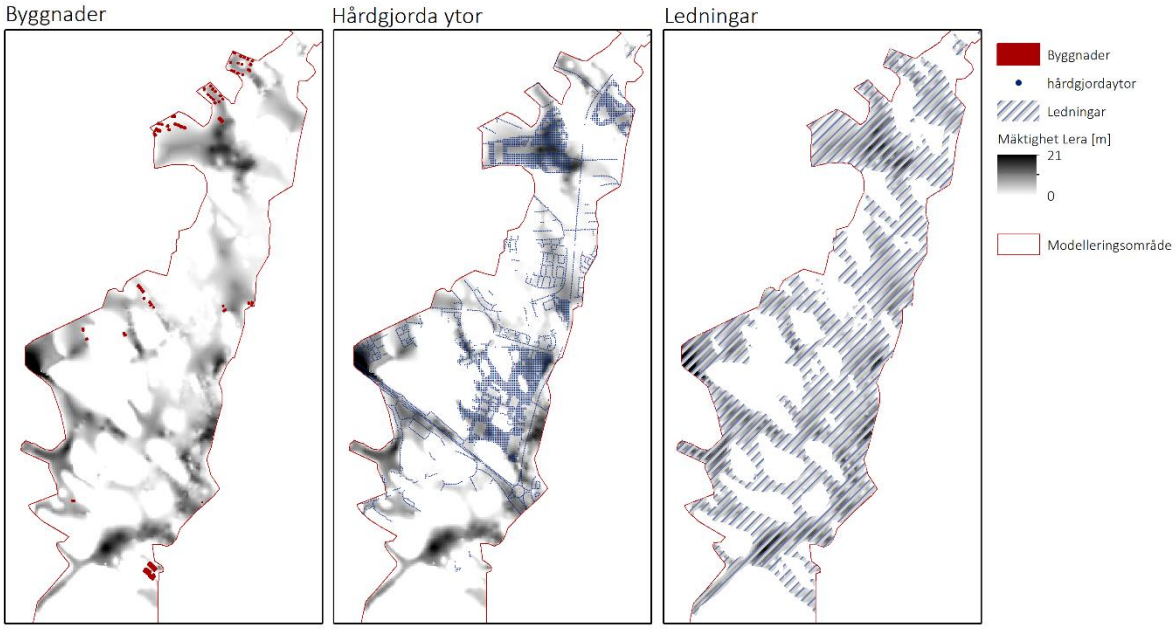
Det förändrade portrycket till följd av grundvattensänkningen beräknas enligt avsnitt 2.5.3 för 1, 2, 4, 15, 40 år efter grundvattensänkningen initierats. Ekvation 1-3 i Tabell 2 väljs utifrån hur den vertikala effektivspänningen (σ'_v) och förändringen i effektivspänning ($\Delta\sigma$) förhåller sig till förkonsolideringstrycket (σ'_c), samt gränsspänningen (σ'_L). genom dessa ekvationer beräknas marksättningen för varje 0,1-

meters intervall. Hela simuleringssekvensen upprepas med 1000 iterationer i varje cell och för de åtgärdsalternativen med grundvattensänkning (Alt 0 och Alt 1).

2.6 Skadeobjekt

Konsekvensen av en marksättning i kostnads-nyttoanalysen beror av om och i så fall till vilken grad skadeobjekt skadas samt vilken kostnad dessa skador medför. Genom att beskriva sambandet sättning-skada samt skada kostnad kan den förväntade ekonomiska konsekvensen av en grundvattensänkning till följd av inläckage till tunneln beräknas.

Påverkansområdet för tunnel norr inhyser flera skadeobjekt: byggnader, ledningar, vägar och andra hårdgjorda ytor, naturområden samt energibrunnar. I denna rapport inkluderas bara skadeobjekt som är känsliga för marksättning vilka är byggnader, ledningar samt vägar och andra hårdgjorda ytor. Positionen för skadeobjekten inom modelleringsområdet redovisas i Figur 8. Inom ramen för denna rapport har endast byggnader med grundläggning i form av platta på mark eller okänd grundläggning beaktats. Byggnader med pålgrundläggning kan också skadas av marksättning då så kallade påhängslaster kan uppstå vid marksättning (Lindskoug & Nilsson, 1974). Påhängslaster har inte beaktats inom ramen för detta projekt eftersom expertgruppen inte bedömde det som relevant. Byggnader med sättningskänslig grundläggning utgörs främst av villor och småhus. I södra delen av modelleringsområdet finns också två större byggnader. Byggnaderna är i regel placerade närmare bergpartier där lermäktigheten är som tunnast. Hårdgjorda ytor utgörs av vägar och parkeringar och lastplatser. Hårdgjorda ytor återfinns inom hela modelleringsområdet. För ledningar har endast vatten- och avloppsledningar beaktats men fjärrvärme, fjärrkyla och gasledningar finns också inom påverkansområdet (Trafikverket, 2011b). Dessa ledningstyper har utelämnats på grund av svårigheter att erhålla relevant data. Positionen för ledningar redovisas inte i denna rapport av sekretesskäl.



Figur 8. Positioner för skadeobjekt inom modelleringsområdet i förhållande till lerans mäktighet. Ledningars position redovisas inte på grund av sekretesskäl.

2.7 Sambandet mellan marksättningens storlek och risken för skada

Detta avsnitt beskriver modellen för sambandet mellan sättning och skada för skadeobjekten vilket motsvarar steg två i Figur 1. Omfattningen av sättningsskador beror av både sättningens storlek och känsligheten hos skadeobjektet. För alla skadeobjekt gäller att sättningsrörelsen kan mätas på olika sätt såsom det totala vertikala sättningsbeloppet i en punkt eller skillnaden mellan sättningsbeloppet i två punkter delat med längden på objektet (differentialsättning). Båda dessa två sätt att mäta sättning har använts för att beskriva sambandet mellan sättning och skada. En skada på ett objekt ger också upphov till skadekostnader för att reparera objektet. Sambandet mellan skada och kostnad beskrivs också i detta avsnitt.

2.7.1 Byggnader

Sambandet mellan sättning och skada för byggnader utgår från den modell som beskrivits i Sundell m.fl. (2018). Modellen delar upp skador på byggnader orsakade av marksättning i tre kategorier efter Driscoll (1995): (1) estetiska skador, exempelvis skador på ytskikt, (2) funktionella skador, exempelvis dörrar som inte går att öppna och stänga, och (3) skador som påverkar byggnadens stabilitet. Dessa tre skadekategorier bedöms uppstå vid olika grad av marksättning enligt följande:

<10 mm: ingen skada (0)
10–30 mm: estetiska skador (1)
30–75 mm: funktionella skador (2)
<75 mm: skador som påverkar byggnadens stabilitet (3)

I Alt 4 ingår åtgärden att de mest sättningskänsliga byggnaderna grundförstärks preventivt innan arbeten som riskerar att påverka grundvattnet genomförs. För att identifiera byggnaderna som preventivt ska grundförstärkas i detta åtgärdsalternativ genomfördes sättningsberäkningar för alla byggnader med sättningskänslig grundläggning inom påverkansområdet för tunneln. Sättningsberäkningarna baserades på portryck efter fullständig konsolidering. Simulering med 1000 iterationer genomfördes och de byggnader där minst 5 % av simuleringarna fick sättningsbelopp >1 cm uppfyllde kriteriet för att grundförstärkas innan arbetet med tunneln påbörjas. För kostnadsnyttoanalysen uteslöts dessa byggnader som skadeobjekt och endast de byggnader som inte genomgått en grundförstärkning bedömdes kunna skadas av en grundvattensänkning. Kostnaden för grundförstärkningen beskrivs i avsnitt 2.9.6.

2.7.2 Ledningar

Ledningar finns inom hela påverkansområdet och riskerar att skadas vid marksättning. Sambandet mellan sättning och skada uttrycks i detta projekt med en modell som tagits fram genom en kombination av litteraturstudie samt expertelicitering. Modellen beskriver sannolikheten för att en ledning ska skadas till en sådan grad att skadan måste åtgärdas som en funktion av marksättningens storlek. Marksättningens storlek har delats in i tre kategorier utifrån de sannolikheter för skada på ledningar som beskrivs i PM hydrogeologi för Förbifart Stockholm (Trafikverket, 2011a). Marksättning på 1–10 cm bedöms representera liten sannolikhet för skada, 10–15 cm representerar måttlig sannolikhet och >15 cm bedöms representera stor sannolikhet. Genom expertelicitering har sannolikheten för skada också bedömts bero av följande parametrar: 1) dimension på ledningen, 2) transporttyp, 3) ledningsmaterial, och 4) anläggningsår. Dimensionen på ledningen har bedömts påverka sannolikheten för skada genom att mindre ledningar såsom serviser lättare knäcks vid marksättning. Transporttyp har delats in i två kategorier, självfallsledningar och trycksatta ledningar. Ledningar med självfall har bedömts som känsligare då även små sättningar kan resultera i förändrade flödesriktningar. Ledningens material samt ledningens anläggningsår har också bedömts påverka sannolikheten för skada. Sannolikheten för nyanlagda ledningar bedöms generellt som lägre än äldre ledningar. Äldre ledningar av exempelvis korrosionskänsliga material bedöms som känsligare än material som inte utsätts för korrosion.

För att simulera en ledningsskada har ledningsnätet inom påverkansområdet sektionerats till punkter med ett avstånd på 10 meter. För varje punkt simuleras marksättningens storlek vilken utgör den mest betydande parametern för att bestämma sannolikheten för skada. Utifrån sättningens storlek, ledningens dimension samt dess transporttyp bedöms sannolikheten för skada för sektionen enligt Tabell 5:

Tabell 5. Sannolikheten för ledningsbrott beroende av marksättningens storlek, dimensionen på ledningen samt ledningens transporttyp.

Marksättning	1–10 cm		10–15 cm		>15 cm	
Dimension	Självfall	Tryck	Självfall	Tryck	Självfall	Tryck
<300	0,09	0,05	0,56	0,48	0,93	0,88
301–800	0,07	0,03	0,54	0,46	0,91	0,86
>801	0,08	0,04	0,55	0,47	0,92	0,87

Eftersom ledningens anläggningsår och materialet på ledningen också bedöms påverka sannolikheten för ledningsbrott adderas sannolikheten från Tabell 5 därefter med sannolikheter i Tabell 6

Tabell 6. Sannolikhet för ledningsbrott beroende av anläggningsår för ledningen samt dess material. Dessa sannolikheter adderas till de sannolikheter som anges i Tabell 5.

Material	Järn	Betong	Plast	Stål	Lergods	Koppar
Anläggningsår						
<1970	0,05	0,03	0,01	0,05	0,03	0,02
1970–2010	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01
>2010	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

När sannolikheten (p) för ett ledningsbrott bestämts simuleras ledningsbrottet med en binomial fördelning (Bi(p,1)). Den binomiala fördelningen kan ge två utfall, skada eller inte skada. Om simuleringen resulterar i skada simuleras kostnaden för skadan i ett nästkommande steg. Om simuleringen inte resulterar i skada bedöms kostnaden för den simuleringspunkten till 0.

2.7.3 Hårdgjorda ytor

Vid marksättning kan vägar och andra hårdgjorda ytor såsom parkeringar eller uppställningsplatser skadas. Skadorna kan exempelvis utgöras av att markens lutning ändras med vattensamlingar som följd. Sättningarna kan också ge upphov till sprickor och gropar. Inom ramen för denna rapport har alla vägbanor samt övriga hårdgjorda ytor bedömts bestå av asfalt. Sambandet mellan sättning och skada har bestämts utifrån detta antagande och beskrivs som att ett nytt lager asfalt bestående av ett slitlager och ett bindemedelslager måste anläggas vid skada. Projektgruppen har utifrån tillgängliga uppgifter samt erfarenhet bedömt att skada uppstår om sättningsbeloppet överstiger 60 mm. Eftersom det finns osäkerheter i bedömningen har ett minsta värde och ett högsta värde också bedömts till 30 respektive 90 mm. Detta beskrivs med en Beta PERT-fördelning med min, mest trolig och max enligt följande:

PERT (30, 60, 90)

2.8 Sambandet mellan skada och skadekostnad

Detta avsnittet beskriver modellen för sambandet mellan skada och skadekostnad vilket motsvarar steg 4 i Figur 1. Skadekostnaderna utgår i detta projekt ifrån kostnaden för att åtgärda skadan.

2.8.1 Byggnader

Sambandet mellan skada och kostnad har uppskattats, precis som sambandet mellan sättning och skada, enligt metodik beskriven av Sundell m.fl. (2018). Modellen utgår från de tre skadekategorierna och sannolikhetsfördelningar för skadekostnader för dessa har bestämts utifrån ett antal rättsfall med ersättning av sättningsskador. Kategori 0 ger inte upphov till några skador och har därför ingen sannolikhetsfördelning.

Skadekostnaden per kvadratmeter bruttoarea för de tre skadekategorierna är som medelvärde 400, 14 000 respektive 38 000 SEK. Modellen för skadekostnad beskrivs genom lognormalfördelningar med medelvärde och standardavvikelse, Lognormal (μ, σ), enligt följande:

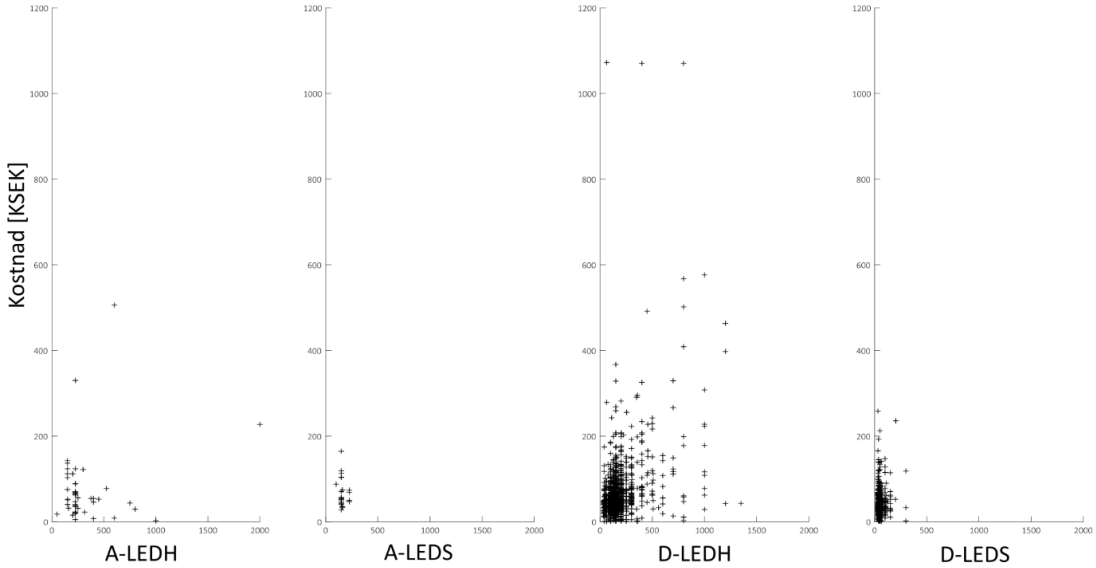
Lognormal (5,99 , 0.557) (1)
Lognormal (9,55 , 0,463) (2)
Lognormal (10,55 , 0,277) (3)

För att simulera kostnaden av sättningen simuleras först sättningen. Sättningsbeloppet i byggnadernas mittpunkt avgör vilken skadekategori som respektive byggnad tillhör. Utifrån funktionen t(s) (se avsnitt 2.5.4) bestäms vid vilken tidpunkt efter att grundvattensänkningen initierats som skadan uppstår. Beroende på vilken skadekategori byggnaden tillhör simuleras en kostnad från tillhörande sannolikhetsfördelningen. Kostnaden för skadan diskonteras i ett följande steg utifrån den bestämda tiden för skada. Detta görs för alla sättningskänsliga byggnader för Alt 0, Alt 1 och Alt 4.

2.8.2 Ledningar

Sambandet mellan skada och kostnad utgår från fem års (2014–2019) registrerade kostnader för ledningsbrott inom Göteborgs stad. Genom expertelicitering bedömdes att framförallt två parametrar påverkade kostnaden vid ett ledningsbrott: ledningstyp och dimension. Ledningstyp bedömdes påverka kostnaderna då avloppsledningar och vattenledningar ofta finns på olika djup vilket kan påverka arbetstiden som krävs för att åtgärda skadan. Vid brott kan också en vattenledning stängas av temporärt under den tiden som skadan åtgärdas för att sedan sättas på igen. För avloppsledningar krävs det istället att spillvattnet/dagvattnet tas om hand under tiden som skadan åtgärdas. Ledningsnätet har i denna rapport delats in i fyra kategorier: 1) avlopp - huvudledning, 2) avlopp - servis, 3) dricksvatten - huvudledning, och 4) dricksvatten - servis. Det bedömdes också att dimensioneringen på ledningen påverkar kostnaden positivt; större ledningar är dyrare att åtgärda. Sambandet mellan dimensionering och kostnad har undersökts med regressionsanalys. Kostnaderna från Göteborgs stads databas

uppdelade efter ledningstyp samt dess relation till dimensionen på ledningen visas i Figur 9.

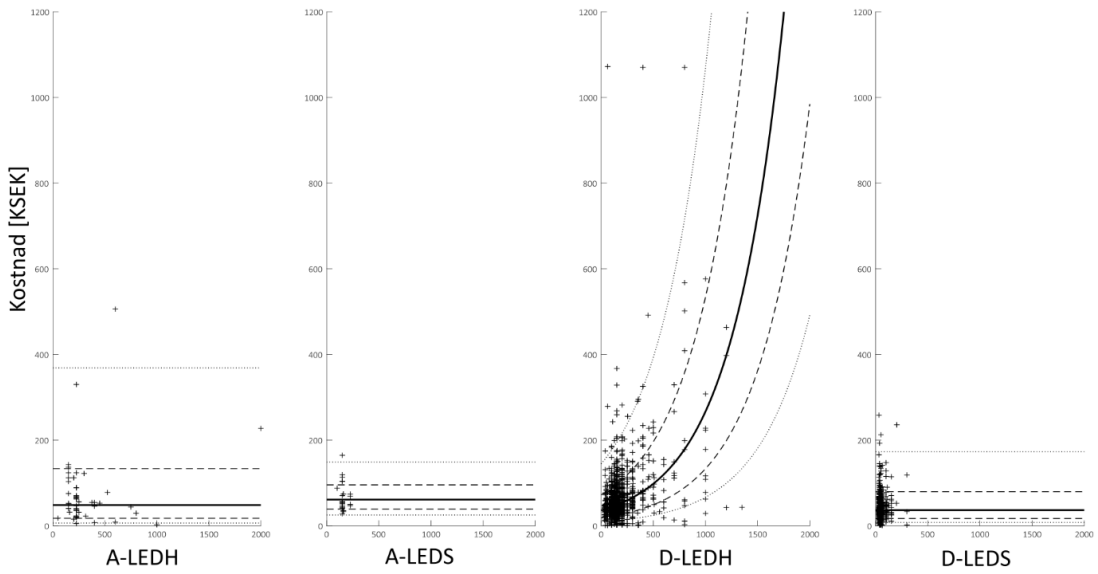


Figur 9. Kostnader för att åtgärda ledningsskador i relation till dimensioneringen på röret [mm]. Kostnaderna är uppdelade efter 1) avlopp - huvudledning (A-LEDH), 2) avlopp – servis (A-LEDS), 3) dricksvatten – huvudledning (D-LEDH), och 4) dricksvatten – servis (D-LEDS). Kostnadsuppgifterna är hämtade ur Göteborgs stads (Kretslopp och vatten) databas20200130.

För att bestämma PDFs för kostnaderna undersöks först om kostnadsdata är normalfördelad. Om data är normalfördelade bestäms medelvärde (μ) och standardavvikelse (σ), annars transformeras data genom den naturliga logaritmen till normalfördelade värden och därefter bestäms μ och σ. Därefter undersökts eventuella trender i kostnader mot dimensionen på röret. En determinationskoefficienten (R^2) nära noll indikerar avsaknad av trend. Ett värde på R^2 större än 0,05 antas indikera ett samband då rörets dimension då förklarar mer än 5 % av variabiliteten för kostnaden. Om R^2 beaktas bestäms medelvärde (μ) och standardavvikelse (σ) utifrån regressionslinjens residualer för att säkerställa att variansen är oberoende av dimensionen. Sannolikhetsfördelningarna för logaritmerade data redovisas i Tabell 7 och Figur 10.

Tabell 7 Determinationskoefficienter, PDFs (normalfördelning) och regressionskoefficienter för variablerna 1) avlopp - huvudledning (A-LEDH), 2) avlopp – servis (A-LEDS), 3) dricksvatten – huvudledning (D-LEDH), och 4) dricksvatten – servis (D-LEDS) för simulering av kostnader för ledningar.

Ledningstyp	R^2	PDF		Regressionskoefficienter	
		μ	σ	a	b
ln(A-LEDH)	0,000	10,786	1,016		
ln(A-LEDS)	0,015	11,022	0,445		
ln(D-LEDH)	0,080	0,000	0,694	0,002	10,494
ln(D-LEDS)	0,000	10,510	0,776		



Figur 10. Kostnader för att åtgärda ledningsskador i relation till dimensioneringen på röret [mm]. Kostnaderna är uppdelade efter 1) avlopp - huvudledning (A-LEDH), 2) avlopp – servis (A-LEDS), 3) dricksvatten – huvudledning (D-LEDH), och 4) dricksvatten – servis (D-LEDS). De streckade linjerna visar en standardavvikelse samt två standardavvikelser (95-procents intervall) för framtida observationer för skadekostnader.

2.8.3 Hårdgjorda ytor

Kostnaden för ett nytt lager asfalt har bedömts till 175 kr/ m^2. För att simulera kostnaden av marksättningen på hårdgjorda ytor har alla hårdgjorda ytor sektionerats till punkter med ett avstånd på 10 meter. Varje punkt representerar 10m^2 asfalt. Sättningsbeloppet i varje punkt avgör hur många gånger ett nytt lager asfalt behöver läggas genom att sättningsbeloppet delas med det simulerade värdet för sambandet mellan sättning och skada. Utifrån funktionen t(s) bestäms efter hur lång tid skada uppkommer. Om asfalten behöver läggas om mer än en gång tas flera tidpunkter fram för varje gång skada uppkommer. Tidpunkten för när skadan uppkommer används för att diskontera kostnaden för ett nytt asfaltlager. Detta görs för alla definierade åtgärdsalternativ.

2.9 Investeringskostnader

Alla åtgärdsalternativ innebär kostnader för projektet. Inom ramen för denna rapport har endast projektinterna kostnader beaktats. Kostnaderna som beaktas inkluderar direkta investeringskostnader i skyddsåtgärder såsom tätning, infiltrationsanläggningar och grundförstärkande åtgärder. Några skyddsåtgärder medför också tidspåslag för projektet. De interna kostnaderna för dessa tidspåslag har beaktats men projektexterna kostnader såsom minskad samhällsnytta av försenat färdigställande av tunneln är potentiellt stora men har inte kunnat beaktas inom ramen för detta arbete. Alla bedömningar av kostnader och de hydrogeologiska förhållandena som ligger till grund för dessa har gjorts av experter inom respektive område inom projekt Förbifart Stockholm och de baseras på erfarenheter av kostnader från detta och andra undermarksprojekt.

2.9.1 Inläckage

Inläckageprognoser för de olika åtgärdsalternativen ligger till grund för bedömningarna av hur mycket tätningsinsatser som krävs samt hur mycket vatten som behöver infiltreras för att bibehålla stabila grundvattennivåer i omgivande grundvattenmagasin. Inläckagebedömningarna har utförts av hydrogeologer inom projektgruppen. Bedömningarna har utgått från de inläckagemätningar som finns för de redan färdigsprängda tunnlarna, genomförda inläckageprognoser för de tunnelsträckor som ännu inte sprängts ut, observationer på plats samt erfarenhet från andra projekt.

Inläckagebedömningarna för de delsträckor som innefattas av analysen visas i Tabell 8. Alt 0 och Alt 2 har båda den ursprungliga tätningsdesignen. Det som skiljer dessa alternativ åt är mängden infiltration där Alt 0 inte har någon infiltration medan Alt 2 har infiltration. Inläckaget är högre för alternativ då inläckaget bedöms öka då den hydrauliska gradienten blir högre som ett resultat av infiltrationen. Alt 1 och Alt 3 har endast uppskattningar för mest troligt inläckage. Detta beror på att dessa åtgärdsalternativ har bedömts ha ett inläckage som motsvarar de inläckagemängder som villkorats i tillståndsdomen. Alt 4 har samma inläckagemängder som Alt 0.

Tabell 8. Bedömda inläckagemängder för de olika åtgärdsalternativen uttryckt i l/min.

	min	mest trolig	max
Alt 0	625	780	975
Alt 1		559	
Alt 2	950	1160	1400
Alt 3		559	
Alt 4	625	780	975

Mängden inläckande vatten i tunneln kan påverka kostnaderna för projektet. Exempel på tillkommande kostnader för ett större inläckage är kostnader för elförbrukning för att pumpa bort vattnet och underhållskostnader för dräner. Inom ramen för detta projekt har inte elförbrukningen av pumpar beaktats. Ökade underhållskostnader till följd av ökad mängd inläckage har beaktats och bedömdes inte vara aktuell för detta projekt då skillnaderna i inläckage inte är så stora att de påverkar utformningen och driften av de system som hanterar de inläckande vattnet. Däremot bedömdes en sträcka med ledningar vara underdimensionerade för Alt 0, Alt 2 och Alt 4. För dessa alternativ har därför en kostnad på 0.1 MSEK inkluderats vilken representerar kostnaden för att byta dessa rör.

2.9.2 Kontraktskostnader

Investeringskostnaderna för de olika åtgärdsalternativen utgår från kontraktskostnaden för att driva tunneln. Alt 0, Alt 2 och Alt 4 har en kontraktskostnad som motsvarar den ursprungliga kontraktssumman som bedömdes tillräcklig för att erhålla en tät tunnel innan de hydrogeologiska förhållandena var fullt kända. Tätningsdesignen för denna kontraktssumma grundar sig på projekteringen av tunneln som utfördes innan byggstart. Den ursprungliga kontraktssumman för berörda delsträckor var 3681 MSEK

vilket inkluderar en overheadkostnad på 526 MSEK. Då undermarksbyggande alltid inkluderar osäkerheter har också projektgruppen bedömt en minsta kostnad samt en hösta kostnad till 3500 MSEK respektive 4200 MSEK.

Alt 1 och Alt 3 har ett tätningskoncept som bedömts kunna innehålla de inläckagevillkor som ställts i tillståndsdomen. Detta tätningskoncept grundar sig på de hydrologiska förhållandena som blev kända efter att tunneln börjat byggas. Tätningskonceptet är ett mera robust injekteringskoncept jämfört med den ursprungliga tätningsdesignen. Detta tätningskoncept utgör grunden för de kontraktskostnader som projektet vid tiden för denna analys hade. Kontraktssumman för det mera robusta injekteringskonceptet är 5427 MSEK vilket inkluderar en overheadkostnad på 719 MSEK. Denna kostnad inkluderar också en försening på 3 år i förhållande till Alt 0. Den minsta kontraktssumman bedöms vara 5200 MSEK och den högsta bedöms vara 5700 MSEK.

Båda dessa kontraktssummor har beskrivits med Beta PERT-fördelningar enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (3500, 3681, 4200)

Beta PERT (5200, 5427, 5700)

2.9.3 Extra tätningsinsatser

För alt 3 krävs extra tätningsinsatser utöver det robusta injekteringskonceptet för att klara tillståndsdomens inläckagevillkor. Dessa tätningsinsatser består av att de sträckor som har stört inläckage behöver tätas med betonginklädnad. En betonginklädnad innebär direkta investeringskostnader för material och arbetsinsats men också indirekta kostnader i form av tidspåslag. De direkta kostnaderna för betonginklädnad består i: 1) strossning av berget för att skapa en större tunnel (detta moment krävs eftersom tunneln inte har varit dimensionerad för betonginklädnad från början), 2) avjämningssprutning, och 3) består av form, armering och gjutning av betongen.

Strossningen och driftförstärkning av berget har bedömts kosta 2,5 MSEK/100 meter betonginklädnad. Avjämningssprutningen har också bedömts kosta 2,5 MSEK/100 meter. Kostnaden för form, armering och gjutning av betonginklädnaden bedöms till 100 MSEK/100 meter. För alla dessa kostnader ingår både arbets- och materialkostnader. Sammanlagt kostar 100 meter betonginklädnad med dessa antaganden 105 MSEK.

Antalet 100 metersträckor som krävs för att kunna innehålla inläckagevillkoren från tillståndsdomen när full infiltration också används bedöms till 17 stycken med ett minsta behov på 9 stycken och ett högsta behov på 31 stycken. Denna bedömning beskrivs med en beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (9, 17, 31)

Kostnaden för betonginklädnad beräknas genom att antalet 100-metersetapper som krävs för att täta till gällande villkor simuleras från sannolikhetsfördelningen. Antalet etapper multipliceras därefter med kostnaden för en 100-metersetapp.

Betonginklädnad innebär också minskade kostnader för efterinjektering. Det minskade behovet av efterinjektering har bedömts till 100 MSEK med en minsta summa på 75 MSEK och en högsta på 120 MSEK. Minskat behov av efterinjektering har också beskrivits med en Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (75, 100, 120)

2.9.4 Förseningar

Att klä in delar av tunneln i betong innebär ökad tidsåtgång för projektet. Strossning och bergförstärkning bedöms ta 5 veckor/100 meter, avjämningssprutning bedöms till 8 veckor/100 meter och form, armering och gjutning bedöms till upp till 1 år/100 meter. Eftersom arbeten kan genomföras på flera ställen samtidigt har den reella extra tidsåtgången som betonginklädnad medför bedömts till 3 år. Minst antal år som krävs har bedömts till 2,5 och flest antal år till 4. Detta beskrivs också med en Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (2,5, 3, 4)

Denna tidsåtgång medför också kostnader för projektet. Då några delsträckor ligger på kritisk linje tillkommer en kostnad för försenade installationer i tunneln. Det tillkommer också kostnader i form av overheadkostnader och programövergripande kostnader. Dessa kostnader beskrivs som MSEK/år med en Beta PERT-fördelningen enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (818, 850, 892)

Kostnaden för förseningar beräknas genom att först simulera tidsåtgången för att anlägga betonginklädnaden från sannolikhetsfördelningen. Kostnaden för förseningar för ett år simuleras därefter från sannolikhetsfördelningen. Därefter multipliceras tidsåtgången med den årliga kostnaden. eftersom kostnaden för förseningen inte kommer med en gång diskonteras också kostnaden för varje år.

2.9.5 Infiltration

Alt 2 och Alt 3 har båda infiltration för att bibehålla stabila grundvattennivåer. Den totala mängden vatten som behöver infiltreras för detta ändamål har bedömts utifrån de uppskattade inläckagemängder för åtgärdsalternativen samt erfarenhet av effekten av de infiltrationsanläggningar som redan finns längst tunneln. För Alt 2 bedöms mängden vatten som behöver infiltreras till 1350 l/min med en minsta mängd på 970 l/min och en högsta mängd på 2050 l/min. För Alt 3 bedöms mängden till 640 l/min med en minsta och högsta mängd på 460 l/min respektive 870 l/min. Dessa bedömningar beskrivs med två Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (970, 1350, 2050)
Beta PERT (460, 640, 870)

Kostnaden för vatten är 0,015 kr/l baserat vad projektet betalar för vatten för redan installerade infiltrationsanläggningar. Den totala kostnaden för att infiltrera erforderlig mängd vatten beräknas genom att först simulera mängden vatten som ska infiltreras

från sannolikhetsfördelningen. Mängden vatten multipliceras därefter med kostnaden per volym för vattnet. Eftersom livslängden på anläggningen uppgår till 120 år måste också vatten infiltreras för samma period. Kostnaden för vattnet diskonteras till nuvärde för vart och ett av de 120 åren.

Kapaciteten för infiltrationsbrunnar varierar. 14 brunnar som finns installerade längst tunneln har en medelkapacitet på 27 l/min, en lägsta kapacitet på 0 l/min och en högsta kapacitet på 80 l/min. Framtida brunnars kapacitet bedöms följa samma trend men för att också inkludera eventuella brunnar med högre kapacitet har den högsta kapaciteten bedömts som högre än 80 l/min. Kapaciteten på infiltrationsbrunnar beskrivs med en Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (0, 27, 100)

Antalet infiltrationsanläggningar som krävs för att infiltrera erforderlig mängd vatten beräknas genom att simulera kapaciteten av en infiltrationsanläggning från sannolikhetsfördelningen. Därefter simuleras kapaciteten av ytterligare en infiltrationsanläggning vilken adderas till den första. Detta steg upprepas tills den sammanlagda kapaciteten från alla simulerade brunnar är större än eller lika stor som den beräknade totala mängden vatten som ska infiltreras.

Kostnaden för att anlägga en infiltrationsanläggning har bedömts till 0,610 MSEK med en lägsta kostnad på 0,253 MSEK och en högsta kostnad på 0,760 MSEK. Dessa kostnader baseras på anläggningskostnaderna för de 14 brunnar som redan finns installerade längst tunneln. Kostnaden för anläggning av infiltrationsbrunnar beskrivs med en beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (0,253, 0,610, 0,760)

Kostnaden för att anlägga infiltrationsbrunnarna beräknas genom att simulera kostnaden för en infiltrationsanläggning från sannolikhetsfördelningen. Därefter simuleras kostnaden för ytterligare en infiltrationsanläggning vilken adderas till den första. Detta steg upprepaslika många gånger som antalet infiltrationsanläggningar som erfordras. Kostnaderna för alla anläggningar summeras därefter för att få den totala anläggningskostnaden.

Kostnaden för underhåll av infiltrationsanläggningarna utgår också från de servicekostnaderna som projektet har på de 14 installerade brunnarna. Kostnaden bedöms till 0,018 MSEK per år och anläggning med en lägsta respektive högsta kostnad på 0,0045 och 0,027. Underhållskostnaden beskrivs med en Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (0,0045, 0,018, 0,027)

Den totala kostnaden för underhåll av infiltrationsanläggningar beräknas genom att först simulera en årlig kostnad för en anläggning. Därefter multipliceras denna kostnad med antalet infiltrationsanläggningar. Eftersom livslängden på anläggningen uppgår till 120 år måste också vatten infiltreras för samma period. Kostnaden för vattnet diskonteras för varje av de 120 åren.

2.9.6 Grundförstärkning av byggnader

För att identifiera byggnaderna som preventivt ska grundförstärkas genomfördes sättningsberäkningar för alla byggnader med sättningskänslig grundläggning inom påverkansområdet för tunneln. De byggnader som var belägna på lera och där minst 5 % av simuleringarna fick sättningsbelopp >1 cm uppfyller kriteriet för att grundförstärkas innan arbetet med tunneln påbörjas. Med denna metod var det totalt 10 byggnader som uppfyllde kriteriet för att grundförstärkas. Alla dessa byggnader var enfamiljshus. Att grundförstärka en villa har bedömts kosta 1,5 MSEK kronor med en minsta kostnad på 1 MSEK och en högsta kostnad på 2,5 MSEK. Denna kostnad beskrivs med en Beta PERT-fördelning enligt följande (min, mest trolig, max):

Beta PERT (1, 1,5, 2,5)

Kostnaden för den preventiva grundförstärkningen beräknas genom att först simulera kostnaden för att grundförstärka en villa. Därefter multipliceras kostnaden med antalet byggnader (10) som ska grundförstärkas.

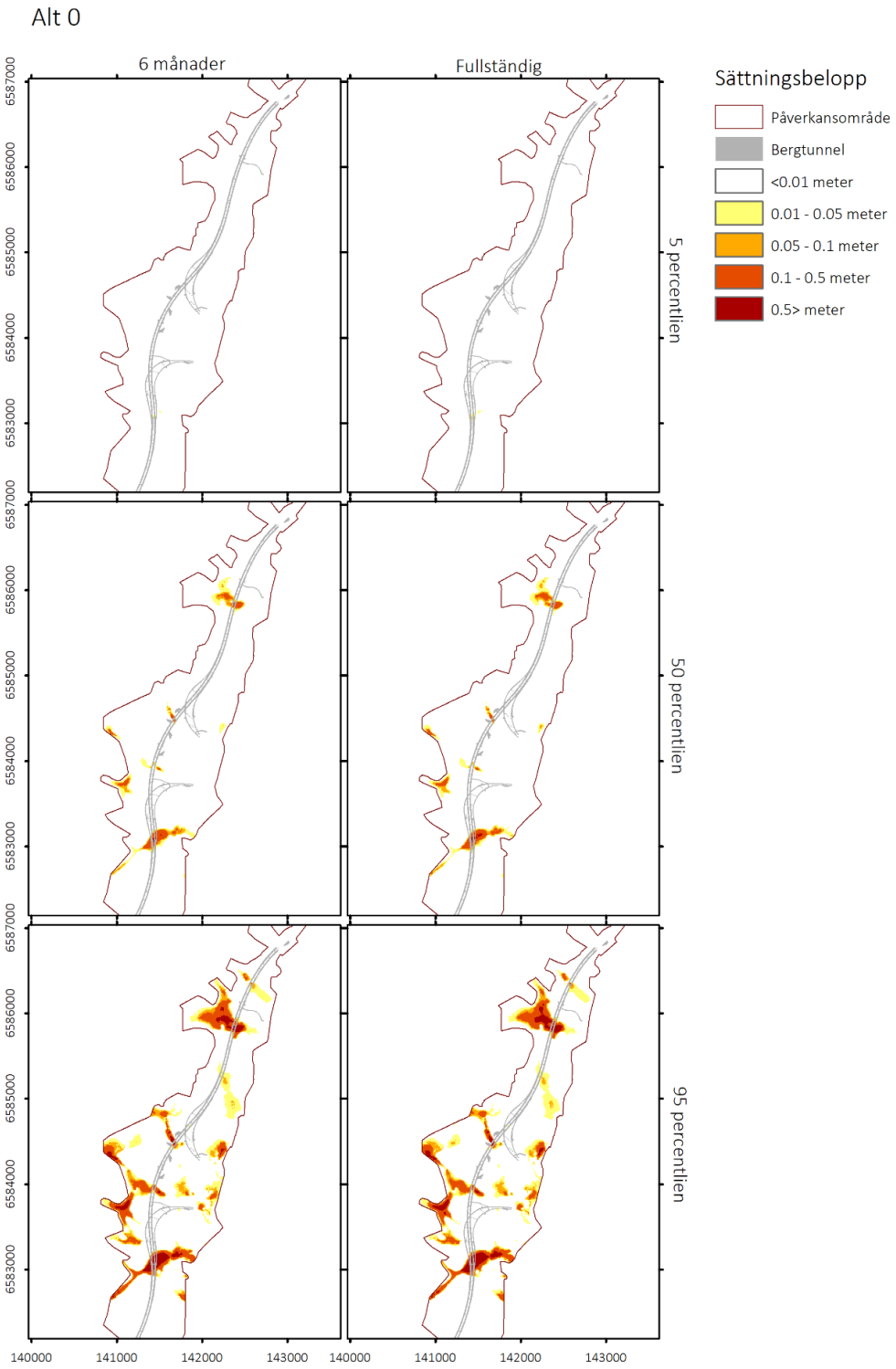
3 Resultat

3.1 Sättningsberäkningar

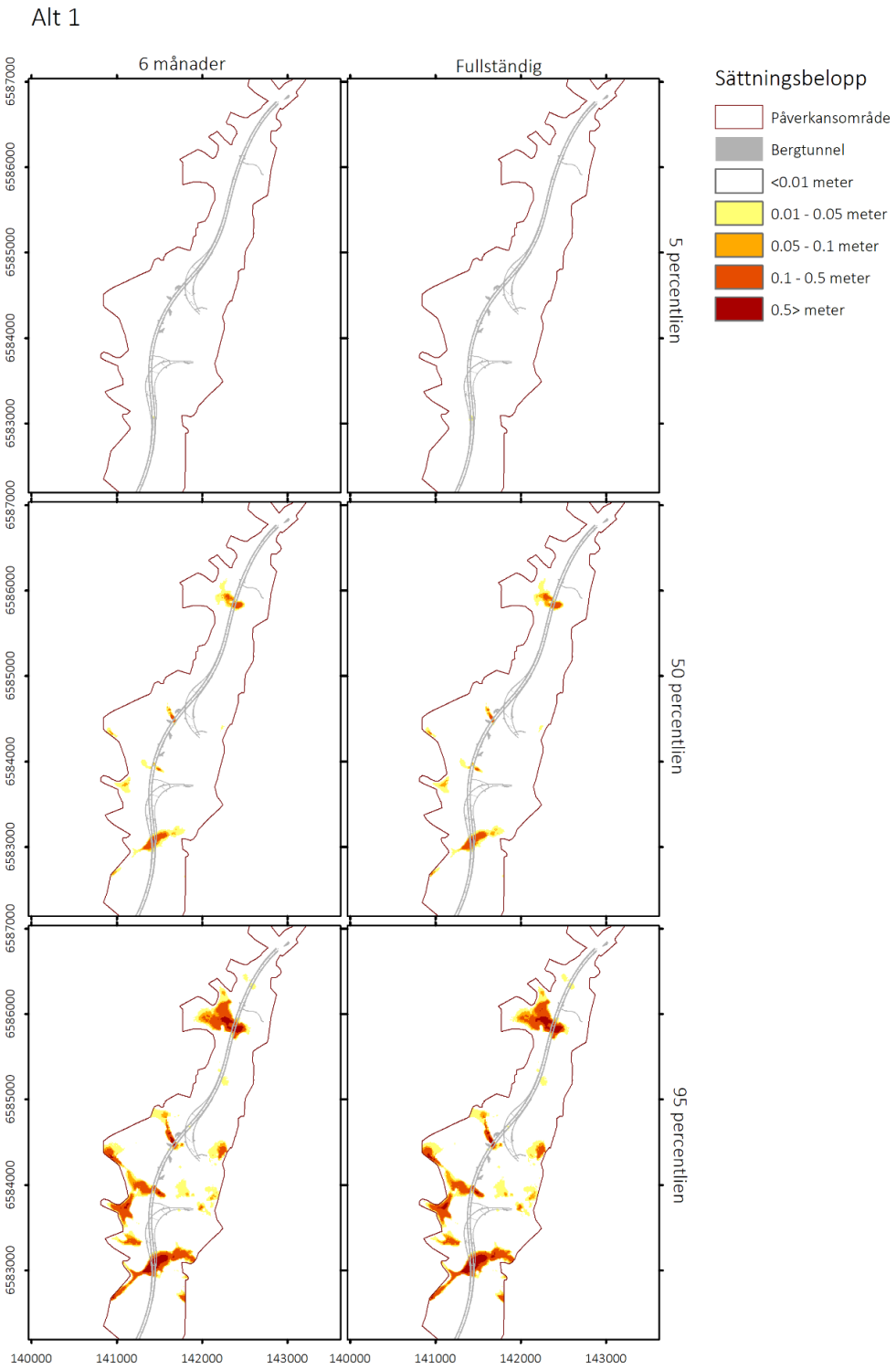
Nedan redovisas resultatet från sättningsberäkningarna. Resultatet redovisas för åtgärdsalteranativ 0 och 1 då det endast är för dessa alternativ som sättningsberäkningar utförts. Marksättningen för åtgärdsalteranativ 4 bedöms vara samma som för referensalternativet. I Figur 11 och Figur 12 redovisas den 5:e, 50:e och 95:e percentilen av marksättningens storlek i varje punkt för konsolidering efter 6 månader och efter fullständig konsolidering. Skillnaden mellan åtgärdsalternativen redovisas också i Figur 13.

Referensalternativet resulterar i stora grundvattensänkningar i stora delar av påverkansområdet och därmed också stora marksättningar som följd. Sättningsbeloppen i de lertäcka områden för detta alternativ är stora. I flera områden är sättningsbeloppen större än 10 cm vilket innebär stor sannolikhet för skada för både byggnader, hårdgjorda ytor och ledningar. För 5:e percentilen utbildas nästan inga marksättningar inom påverkansområdet. För den 95:e percentilen utbildas marksättningar större än 50 cm i flera områden. Den stora spridningen i marksättningen mellan percentilerna är en konsekvens av den stora osäkerheten i de geotekniska ingångsparametrarna. Det är viktigt att poängtera att sannolikheten att en marksättning av den 95:e percentilens storlek skulle ske över hela området enligt de genomförda simuleringarna är mindre än 5%.

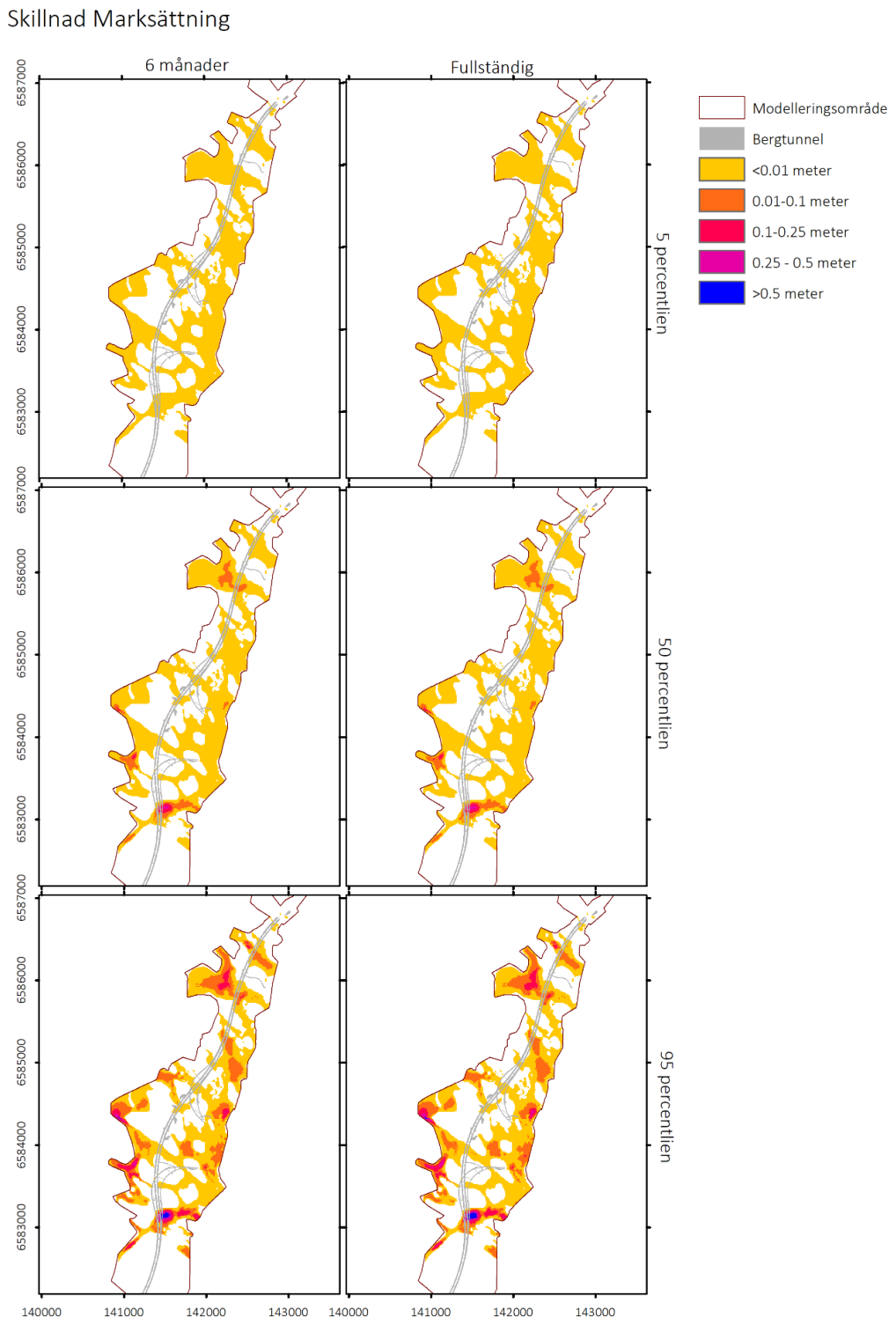
Marksättningen inom påverkansområdet för åtgärdsalteranativ 1 är generellt mindre än de för åtgärdsalternativ 0. Det är dock viktigt att notera att även detta åtgärdsalternativ resulterar i stora marksättningar. Spridningen i marksättningen storlek är även för detta åtgärdsalternativ stor.



Figur 11. Simulering av marksättning efter 6 månader och efter fullständig konsolidering för 5:e, 50:e och 95:e percentilen för åtgärdsalternativ 0.



Figur 12. Simulering av marksättning efter 6 månader och efter fullständig konsolidering för 5:e, 50:e och 95:e percentilen för åtgärdsalternativ 1.



Figur 13. Skillnaden i marksättningens storlek för åtgärdsalternativ 0 och 1 efter 6 månader och efter fullständig konsolidering för den 5:e, 50:e och 95:e percentilen.

3.2 Kostnads-nyttoanalys

Resultatet av kostnads-nyttoanalysen för tidshorisonten 120 år och med en diskonteringsränta på 0, 1,4 och 3,5 % presenteras i Figur 14-Figur 16. Figurerna visar kostnaderna, nyttorna samt nettonuvärdet för åtgärdsalternativ 1–4 jämfört med referensalternativet (Alt 0) i miljoner svenska kronor (MSEK). För att beskriva resultatens osäkerheter presenteras resultaten med den 5:e, 50:e och 95:e percentilerna. Mer detaljer gällande skadekostnader och investeringskostnader för åtgärdsalternativen redovisas i Appendix .

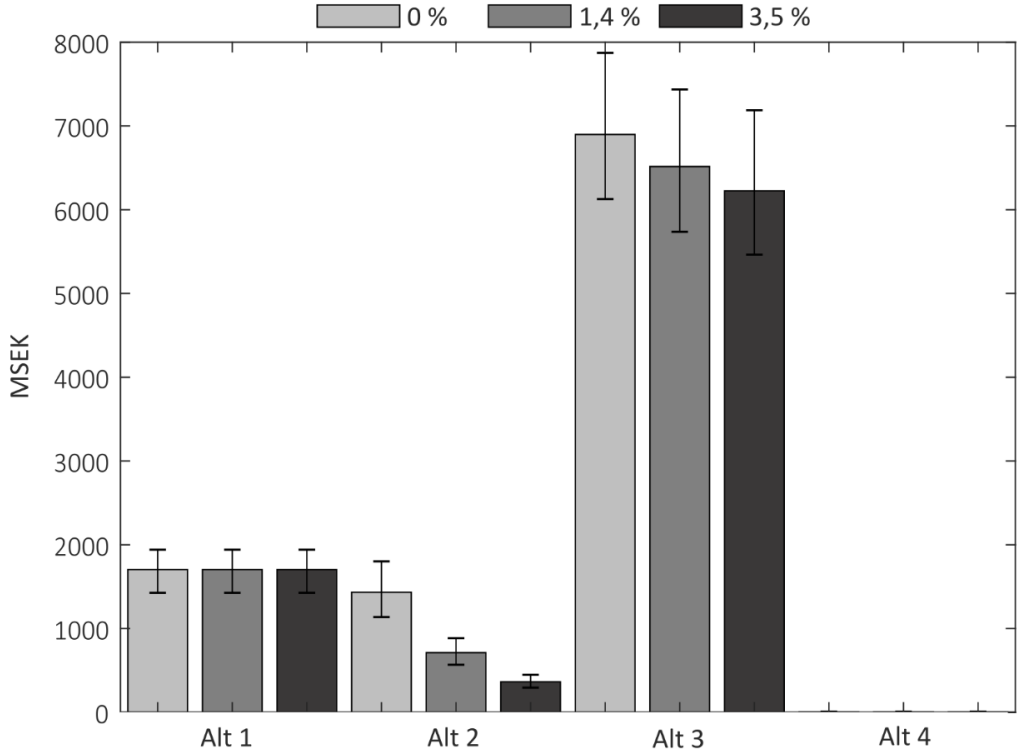
3.2.1 Kostnader

Åtgärdsalternativ 3, vilket utgörs av en tätningsdesign som klarar inläckagevillkoren från miljödomen samt infiltration för att undvika påverkan på grundvattennivåerna är det alternativet som har den högsta investeringskostnaden. Detta alternativ är det enda som inkluderar sträckor med betonginklädnad och det är både investeringskostnaden för betonginklädnaden och de förseningskostnader som arbetet med betonginklädnaden medför som orsakar detta alternativs höga kostnader. Valet av diskonteringsränta påverkar kostnaden för detta alternativ då återkommande kostnader för infiltrationsanläggningar har beaktats för hela anläggningens livslängd på 120 år.

Åtgärdsalternativ 1 är det alternativ som har näst högst kostnader. Detta alternativ utgörs också av en tätningsdesign som klarar inläckagevillkoren men ingen infiltration. Trots att detta alternativ också klarar inläckagevillkoren är kostnaderna betydligt lägre jämfört med alternativ 3. Detta beror av att inläckagekraven bedöms kunna innehållas med ett enbart en robust injekteringsdesign istället för med betonginklädnad som för alternativ 3. Det minskade behovet av tätning är en följd av att detta alternativ inte inkluderar någon infiltration vilket i sin tur medför lägre grundvattennivåer i tunnelns närområde. Lägre grundvattennivåer medför lägre gradienter och därmed lägre inläckage till tunneln. Eftersom detta alternativ inte innefattar några framtida investeringar har diskonteringsränta ingen betydelse för kostnaden.

Åtgärdsalternativ 2 har näst lägst kostnader. Detta alternativ utgörs av den ursprungliga injekteringsdesignen och infiltration för att motverka påverkan på grundvattennivåerna. Eftersom injekteringsdesignen är den samma som för referensalternativet (Alt 0) så är det endast kostnaden för infiltrationsanläggningarna som beaktas här. Då infiltrationsanläggningarna innebär återkommande kostnader under anläggningens hela livslängd påverkar valet av diskonteringsräntan kostnaden för detta alternativ.

Åtgärdsalternativ 4 är det alternativet som har lägst kostnader. Detta alternativ utgörs av den ursprungliga injekteringsdesignen samt preventiv grundförstärkning av de byggnader som innan tunneldrivningen startats bedömts som sättningskänsliga. För detta alternativ är det endast den preventiva grundförstärkningen som skiljer alternativet från referensalternativet vilket gör att det endast är kostnaden för grundförstärkning som beaktas här. Grundförstärkningen görs innan tunneldrivningen startar vilket medför att valet av diskonteringsränta inte har någon betydelse för kostnaden för detta alternativ.



Figur 14 Kostnaderna för åtgärdsalternativ 1–4 relativt referensalternativet. Staplarna visar kostnaderna för den 50:e percentilen och det svarta linjesegmentet representerar intervallet mellan den 5:e respektive den 95:e percentilen. Färgen på stapeln representerar diskonteringsräntan där de ljust gråa staplarna representerar en diskonteringsränta på 0 %, den mörkare grå representerar 1,4 % och den mörkast grå representerar 3,5 %.

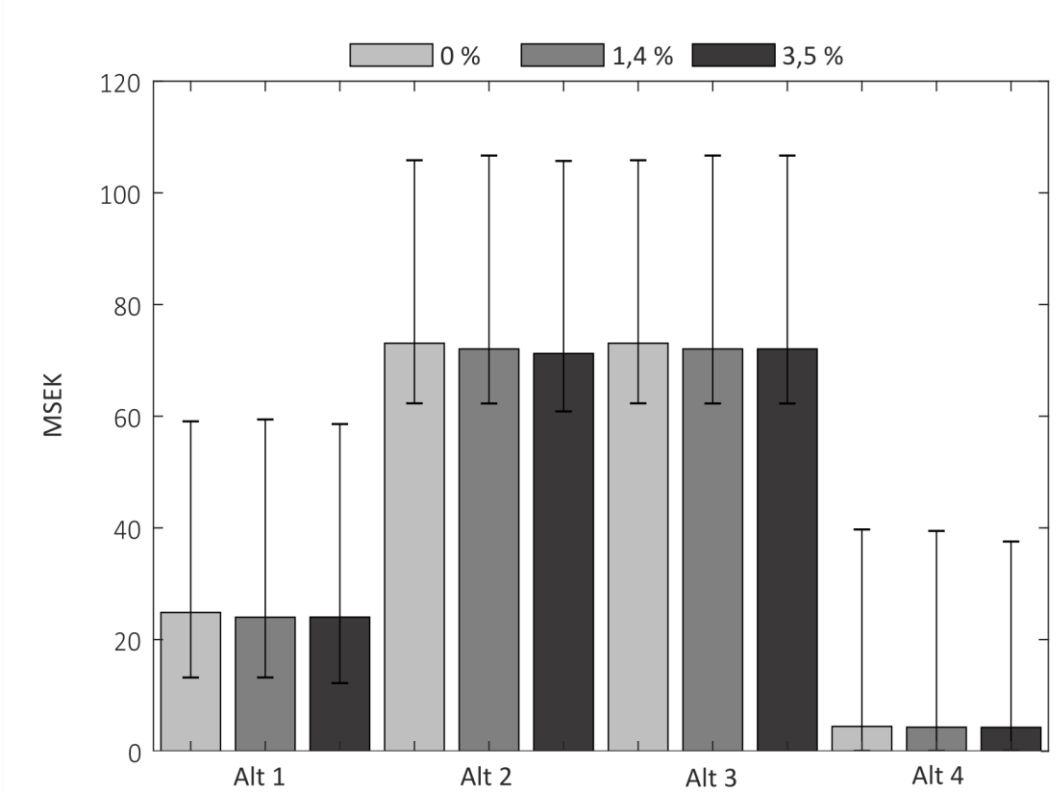
3.2.2 Nyttor

Åtgärdsalternativ 2 och 3 vilka båda har infiltration som motverkar någon påverkan på grundvattennivåerna har de största nyttorna. Detta eftersom ingen ekonomisk skada till följd av marksättning kan uppkomma om grundvattennivån inte påverkas.

Åtgärdsalternativ 1 har näst högst/lägst nyttor. Det som skiljer detta alternativ från referensalternativet är den mer robusta tätningsdesignen som uppfyller inläckagevillkoren i tillståndsdomen. Detta tätningskoncept resulterar i lägre inläckage, mindre påverkan på grundvattennivåerna, mindre sättningar och därmed mindre skador och skadekostnader på byggnader, ledningar och hårdgjorda ytor. Jämfört med åtgärdsalternativ 2 och 3 vilka har infiltration är dock nyttorna små.

Åtgärdsalternativ 4 har den lägsta nyttan. Detta beror av att det endast är den preventiva grundförstärkningen av de mest sättningskänsliga byggnaderna som skiljer detta alternativ från referensalternativet. Det är alltså bara minskade skadekostnader för byggnader som utgör nyttorna.

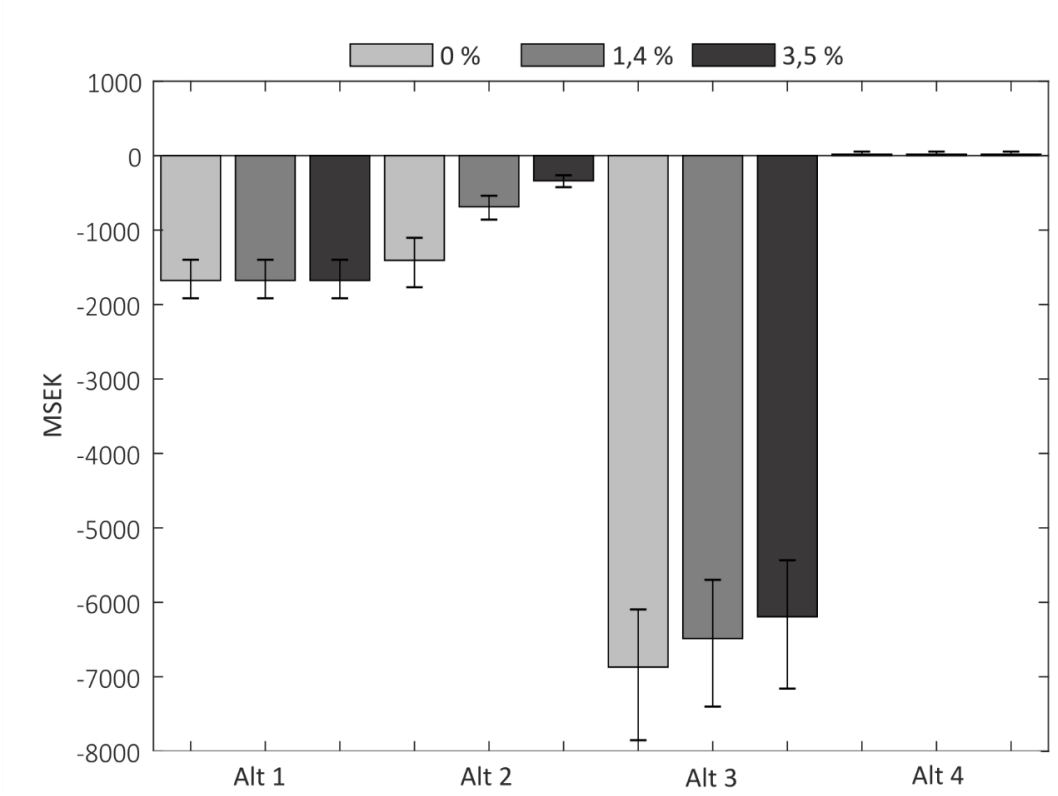
Generellt har diskonteringsräntan liten effekt på skadekostnaderna och därmed nyttorna. Även om skadan är fördröjd från den initierade grundvattensänkningen är fördröjningen inte tillräckligt stor för att det ska ge stora utslag.



Figur 15 Nyttorna för åtgärdsalternativ 1–4 relativt referensalternativet. Staplarna visar nyttorna för den 50:e percentilen och det svarta linjesegmentet representerar intervallet mellan den 5:e respektive den 95:e percentilen. Färgen på stapeln representerar diskonteringsräntan där de ljust gråa staplarna representerar en diskonteringsränta på 0 %, den mörkare grå representerar 1,4 % och den mörkast grå representerar 3,5 %.

3.2.3 Nettonuvärde

Det är endast åtgärdsalternativ 4 som har ett positivt nettonuvärde. Alla de andra åtgärdsalternativen har investeringskostnader som är högre än nyttorna som åtgärden medför i form av minskade skadekostnader. Då nyttorna för alla alternativen är relativt små i förhållande till investeringskostnaden för att genomföra åtgärden är det främst kostnaderna som ger utslag på nettonuvärdet.



Figur 16. Nettonuvärdet för åtgärdsalternativ 1–4 relativt referensalternativet. Staplarna visar nettonuvärdet för den 50:e percentilen och det svarta linjesegmentet representerar intervallet mellan den 5:e respektive den 95:e percentilen. Färgen på stapeln representerar diskonteringsräntan där de ljust gråa staplarna representerar en diskonteringsränta på 0 %, den mörkare grå representerar 1,4 % och den mörkast grå representerar 3,5 %.

4 Diskussion

Det övergripande syftet med detta arbete har varit att genomföra en samhällsekonomisk analys (kostnads-nyttoanalys) av olika åtgärder för att minska risken för skador på byggnader och anläggningar från marksättningar som beror av grundvattenbortledning. Kostnads-nyttoanalysen kan fungera som underlag vid beslutsfattande av vilka åtgärdsalternativ som ska genomföras för att minska risken för skada vilket kan bidra till ökad transparens och välinformerade beslut. Det är viktigt att påpeka att resultatet från modellen i sig inte utgör ett beslut gällande vilka åtgärder som ska implementeras utan resultatet ska endast ses som ett av flera beslutsunderlag. Det finns flera faktorer som inte ryms inom det utilitaristiska (renodlat konsekvensbaserade) ramverk som kostnadsnyttoanalysen utgör och som därmed inte tas hänsyn till i analysen. Exempelvis utvärderas inte hur åtgärdsalternativen förhåller sig till lagar och normer eller till vilken grad det är etiskt motiverat att genomföra en viss åtgärd (Aven, 2012). Som ett exempel är det endast åtgärdsalternativ 3 som med säkerhet uppfyller inläckagevillkoren samt inte orsakar någon skadlig omgivningspåverkan (se Tabell 1). Även om kostnads-nyttoanalysen har sina begränsningar utgör den dock ett viktigt underlag för att diskutera vad ett bra beslut är och vilket underlag som krävs för att kunna fatta ett bra beslut. En viktig aspekt vid strategiska beslut är naturligtvis hur samhällets begränsade resurser ska användas på bästa sätt.

Nyttorna av tätning i form av minskade skadekostnader är små relativt kostnaderna för att genomföra tätningsåtgärderna. Även om tätningsinsatserna minskar risken för skada så krävs det också infiltration för att helt undvika skada. Att nyttorna av skyddsåtgärderna är små beror främst av att skadeobjekten är få inom påverkansområdet. Exempelvis är de flesta byggnader som har en sättningskänslig grundläggning enskilda villor med placering nära bergspartier där lermäktigheten är liten. Åtgärdsalteranativ 2 och 4 efterlever inte inläckagevillkoren. Åtgärdsalternativ 2 orsakar ingen skada medan åtgärdsalternativ 4 motverkar skada på byggnader. Båda dessa senare alternativ är betydligt billigare att genomföra än de åtgärdsalteranativ (Alt 1 och 3) som klarar inläckagevillkoren. Analysen visar att det är samhällsekonomiskt lönsamt att preventivt grundförstärka sättningskänsliga byggnader. Lönsamheten i och möjligheten att hantera skaderisken för andra skadeobjekt såsom vägar och ledningar genom ett liknande förhållningssätt har inte utretts inom ramen för detta arbete. Det är dock av intresse att undersöka detta närmare i framtida kostnads-nyttoanalyser av olika åtgärdsalternativ.

Som redan beskrivits i inledning av denna rapport finns det två typer av risker: 1) att inte genomföra en åtgärd som borde genomföras med skador på omgivningen som följd, och 2) att genomföra en åtgärd som inte borde genomföras med onödiga kostnader som följd. Villkoren i tillståndet syftar till att begränsa skadlig påverkan från undermarksanläggningen. Mot bakgrund av detta kan villkoren ses som en strategi för riskhantering där fokus är att undvika risk 1. Fallet med Förbifart Stockholms norra del pekar dock mot att villkorens utformning förutom att skydda mot skada resulterar i en mycket hög risk 2, alltså onödiga kostnader för tätningsinsatser. Mot bakgrund av detta

är det relevant att ifrågasätta nyttorna med inläckagevillkoren såsom de är utformade i tillståndsdomen för det aktuella området.

Det är viktigt att poängtera att det finns flera nyttor och kostnader som inte beaktats i denna analys. Det finns bland annat skadeobjekt såsom fjärrvärmeledningar som inte har inkluderats i analysen. Det är dock inte troligt att resultatet och slutsatserna av analysen hade ändrats nämnvärt av att inkludera även dessa skadeobjekt. Vidare är det endast projektinterna kostnader och nyttor som beaktats. Om även externa kostnader och nyttor hade beaktats är det möjligt att nettonuvärdet och den inbördes ordningen av åtgärdsalternativen hade ändrats. Exempel på externa åtgärder som bör beaktas vid en kostnadsnyttoanalys är miljö- och klimateffekter. Exempelvis innebär en robustare tätningsdesign större utsläpp av koldioxid eftersom både injekteringsbruk samt betonginklädnad har ett stort CO_2-avtryck. Ett annat exempel är den minskade samhällsnyttan som en försening innebär. Om dessa konsekvenser inkluderats är det troligt att den samhällsekonomiska lönsamheten av flera av åtgärderna blivit ännu sämre.

Varje påverkansområde för ett undermarksprojekt är unikt och inhyser olika typer av skadeobjekt. För Förbifart Stockholms norra del är skadeobjekten relativt få. Om samma modell använts för ett mer tätbebyggt område med fler skadeobjekt hade också nyttorna blivit större. Fokus i denna rapport har också bara varit på sättningskänsliga skadeobjekt men för andra tunnelprojekt och påverkansområdet kan skadeobjekten istället utgöras av andra skadeobjekt, såsom grundvattenberoende ekosystem, kulturhistoriskt viktiga byggnader eller jordbruk. Resultat från kostnads-nyttoanalysen är därför inte universellt utan gäller endast för denna specifika fallstudie.

För framtida användning av kostnads-nyttoanalyser av åtgärdsalternativ för hantering av hydrogeologiska risker vid undermarksbyggande rekommenderas att analysen genomförs i ett projekts tidiga faser för att sedan uppdateras genom projektet när ny kunskap vinns. Då blir analysen mera användbar som underlag för strategisk styrning av projektet. Således kan kostnads-nyttoanalysen utgöra ett beslutsunderlag under ett projekts alla faser. Exempelvis kan den användas vid val av lokalisering, som underlag för rimlighetsavvägningen under tillståndsförhandlingen, och vid val av riskreducerande åtgärder under byggskedet.

5 Slutsatser

De huvudsakliga slutsatserna från detta arbete är:

- Kostnads-nyttoanalysen utgör en strukturerad modell för att utvärdera lönsamheten för olika åtgärdsalternativ.
- Det probabilistiska angreppssättet utgör ett transparent sätt att hantera osäkerheter och möjliggör beräkningar av sannolikheter för exempelvis olika grad av kostnader för ett åtgärdsalternativ.
- Åtgärdsalternativ 4, vilket inkluderar injekteringsdesign enligt bygghandling samt preventiv grundförstärkning av sättningskänsliga byggnader, är det enda åtgärdsalternativet som inte har ett negativt nettonuvärde och är därmed det åtgärdsalternativ som är samhällsekonomiskt mest lönsamt.
- Nettonyttan i form av minskad ekonomisk skaderisk är liten relativt kostnaderna för att genomföra åtgärderna på grund av de få skadeobjekt som området inhyser samt de stora investeringskostnaderna som tätningsåtgärderna medför.
- Kostnaden för att genomföra de åtgärder som krävs för att efterleva villkoren i tillståndsdom M11838-14 står inte i proportion till nyttorna som erhålls. Villkorens utformning är således orimliga.
- Extra tätningsinatser i form av betonginklädnad samt förseningen som detta medför är de kostnader som har stört påverkan på nettonuvärdet. Osäkerheten för dessa parametrar har därmed störst betydelse för osäkerheten i resultatet.

Referenser

Andersson, P., & Sellner, A. (2000). *Tätning av bergtunnlar–förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*. Retrieved from https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10421/RelatedFiles/2000_101_tatning_av_bergtunnlar.pdf

Attanayake, P. M., & Waterman, M. K. (2006). Identifying environmental impacts of underground construction. *Hydrogeology Journal, 14*(7), 1160-1170.

Aven, T. (2012). *Foundations of risk analysis*: John Wiley & Sons.

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2017). *Cost-benefit analysis: concepts and practice*: Cambridge University Press.

Boone, S. J. (1996). Ground-movement-related building damage. *Journal of geotechnical engineering, 122*(11), 886-896.

Driscoll, R. (1995). Assessment of damage in low-rise buildings, with particular reference to progressive foundation movement

Graffner, O. (2007). *Miljöuppföljning bergtunnelsprojekt* (2007:2). Retrieved from

Ilsley, R. C., Powers, J. P., & Hunt, S. W. (1991). *Use of recharge wells to maintain groundwater levels during excavation of the Milwaukee deep tunnels.* Paper presented at the The 10 th Rapid Excavation and Tunneling Conference, Seattle, WA, USA, 06/16-20/91.

Kværner, J., & Snilsberg, P. (2013). Hydrogeological impacts of a railway tunnel in fractured Precambrian gneiss rocks (south-eastern Norway). *Hydrogeology Journal, 21*(7), 1633-1653.

Larsson, R., & Sällfors, G. (1981). Beräkning av sättningar i lera. *Väg-och vattenbyggaren, 3*, 39.

Lindskoug, N.-E., & Nilsson, L.-Y. (1974). *Grundvatten och byggande*. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/78626653.pdf

Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., & Fazar, W. (1959). Application of a technique for research and development program evaluation. *Operations research, 7*(5), 646-669.

Müller, R., Larsson, S., & Spross, J. (2014). Extended multivariate approach for uncertainty reduction in the assessment of undrained shear strength in clays. *Canadian Geotechnical Journal, 51*(3), 231-245.

Nordzell, H., Scharin, H., & Söderqvist, T. (2017). Att göra rimlighetsavvägningen enligt 2 kap. § 7 miljöbalken. In: Rapport.

O'Hagan, A., Buck, C. E., Daneshkhah, A., Eiser, J. R., Garthwaite, P. H., Jenkinson, D. J., . . . Rakow, T. (2006). *Uncertain judgements: eliciting experts' probabilities*: John Wiley & Sons.

Panthi, K., & Nilsen, B. (2005). *Significance of grouting for controlling leakage in water tunnels: A case from Nepal.* Paper presented at the Proceedings of ITA-AITES 2005 world tunnelling congress and 31st ITA General Assembly, Istanbul, Turkey.

Persson, J. (2007). *Hydrogeological Methods in Geotechnical Engineering: Applied to settlements caused by underground construction.* (Doctoral Thesis), Chalmers University of Technology, Gothenburg. (2665)

Salling, K. B. (2007). Risk analysis and Monte Carlo simulation within transport appraisal. *Centre for Traffic and Transport, CTT-DTU, Build, 115*, 1-25.

Stille, H. (2015). *Rock grouting: theories and applications*: Befo, Rock Engineering Research Foundation.

Sundell, J. (2018). *Risk assessment of groundwater drawdown in subsidence sensitive areas.* (Doctoral thesis), Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Sundell, J., Haaf, E., Norberg, T., Alén, C., Karlsson, M., & Rosén, L. (2017). Risk Mapping of Groundwater-Drawdown-Induced Land Subsidence in Heterogeneous Soils on Large Areas. *Risk Analysis*.

Sundell, J., Haaf, E., Tornborg, J., & Rosén, L. (2018). *Comprehensive Risk Assessment of Groundwater Drawdown Induced Subsidence*. Manuscript submitted for publication.

Sundell, J., Rosén, L., Norberg, T., Wladis, D., & Alén, C. (2015). *A Framework for Risk Assessment of Groundwater Drawdown Induced Subsidence*. Paper presented at the International Sympisum on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2015), Rotterdam, the Netherlands.

Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics* (Vol. 66): LWW.

Trafikverket. (2011a). E4 Förbifart Stockholm - PM Hydrogeologi. In: Trafikverket.

Trafikverket. (2011b). MKB vattenverksamhet Förbifart Stockholm.

Trafikverket. (2013). *PM Planredovisade sättningar till följd av ev gv-sänkningar i Förbifart Stockholm-projektet*. Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/8ee802f438714e0da9d481dac339dc7d/provningar/mmd-mars-2013/gvb_bilaga_9_pm-planredovisade-sattningar-201303.pdf

Trafikverket. (2018). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-6.1/asek_6_1_hela_rapporten_180412.pdf

Vatovec, M., & Kelley, P. L. (2007). Biodegradation of Untreated Wood Foundation Piles In Existing Buildings. *STRUCTURE, 54*.

Appendix 1 - Parametervärden och områdesindelning

id	N koordinat	E koordinat	Z koordinat	Djup [m]	σ´c [kPa]	σ´L [kPa]	M´	ML [kPa]	ρ [t/m3]	M0	Område
08F730	6589524.3752	144872.7873	18.0550	2.00	37.00	64.00	12.70	439.00	1.69		1
08F730	6589524.3752	144872.7873	18.0550	3.00	26.00	57.00	12.90	394.00	1.71		1
08F730	6589524.3752	144872.7873	18.0550	5.00	67.00	97.00	12.00	468.00	1.61		1
08F730	6589524.3752	144872.7873	18.0550	7.00	80.00	121.00	18.50	688.00	1.73		1
08F720	6589386.3471	144735.1829	17.9550	2.00	78.00	155.00	14.80	1058.00	1.66		1
08F720	6589386.3471	144735.1829	17.9550	3.00	47.00	53.00	13.70	164.00	1.65		1
09F713	6589359.9130	144844.8810	17.6550	1.00	29.00	54.00	16.20	489.00	1.40		1
09F713	6589359.9130	144844.8810	17.6550	3.00	33.00	49.00	18.80	461.00	1.46		1
09F713	6589359.9130	144844.8810	17.6550	6.00	62.00	63.00	17.20	199.00	1.74		1
09F713	6589359.9130	144844.8810	17.6550	9.00	80.00	100.00	15.80	348.00	1.67		1
09F713	6589359.9130	144844.8810	17.6550	12.00	97.00	137.00	16.70	689.00	1.69		1
08F634	6588600.4153	144100.3494	13.2550	2.00	97.00	160.00	14.70	1163.00	1.79		1
08F634	6588600.4153	144100.3494	13.2550	3.00	54.00	87.00	12.50	462.00	1.65		1
08F634	6588600.4153	144100.3494	13.2550	4.00	46.00	56.00	17.10	241.00	1.65		1
08F634	6588600.4153	144100.3494	13.2550	5.00	68.00	92.00	16.80	231.00	1.67		1
08F634	6588600.4153	144100.3494	13.2550	6.00	71.00	94.00	15.60	328.00	1.73		1
08F596	6588591.1702	144626.6156	16.1550	4.10	129.00	289.00	14.50	453.00	1.85		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	2.00	66.00	100.00	13.80	844.00	1.65		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	3.00	60.00	72.00	15.40	255.00	1.62		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	4.00	63.00	74.00	11.60	228.00	1.48		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	5.00	39.00	78.00	14.00	403.00	1.48		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	6.00	63.00	102.00	16.50	473.00	1.67		1
08F684	6587713.7162	143665.7669	12.9550	8.00	82.00	107.00	19.50	322.00	1.68		1
08T602	6587027.3639	142647.3281	23.0550	3.00	75.00	127.00	15.00	1261.00	1.81		1

08F598	6586582.3620	142313.3303	19.3550	3.00	92.00	134.00	16.00	690.00	1.77		1
08F598	6586582.3620	142313.3303	19.3550	4.00	96.00	152.00	16.10	771.00	1.76		1
08F598	6586582.3620	142313.3303	19.3550	6.00	115.00	129.00	14.70	364.00	1.73		1
08F598	6586582.3620	142313.3303	19.3550	8.00	105.00	157.00	14.90	707.00	1.77		1
08T637	6586430.0000	142167.0000	19.7550	4.00	69.00	85.00	15.50	391.00	1.69		1
12A196	6586334.2020	142579.6080	19.7320	2.70	88.00	179.00	11.10	1672.00	1.72	8209	1
12A196	6586334.2020	142579.6080	19.7320	5.00	102.00	152.00	18.60	1609.00	1.94	6220	1
08T638	6586268.0000	142260.0000	20.0550	3.00	122.00	154.00	14.30	817.00	1.74		1
08T638	6586268.0000	142260.0000	20.0550	4.00	70.00	112.00	16.50	1040.00	1.74		1
08T638	6586268.0000	142260.0000	20.0550	6.00	127.00	196.00	12.90	918.00	1.73		1
08F599	6586172.0664	142780.3713	19.0550	3.00	69.00	104.00	9.60	1202.00	1.73		1
08F599	6586172.0664	142780.3713	19.0550	4.00	82.00	105.00	14.40	706.00	1.67		1
08F599	6586172.0664	142780.3713	19.0550	6.00	85.00	132.00	14.60	607.00	1.73		1
10F602	6585983.5780	142190.5700	18.8550	4.00	71.00	139.00	15.70	1060.00	1.71		1
10F602	6585983.5780	142190.5700	18.8550	5.00	73.00	119.00	11.70	689.00	1.70		1
10F602	6585983.5780	142190.5700	18.8550	6.00	83.00	115.00	12.00	681.00	1.60		1
10F602	6585983.5780	142190.5700	18.8550	8.00	85.00	125.00	17.90	889.00	1.70		1
10F601	6585927.9710	141941.1260	18.9550	2.00	91.00	200.00	11.00	2110.00	1.76		1
10F601	6585927.9710	141941.1260	18.9550	3.00	52.00	85.00	15.10	580.00	1.67		1
10F601	6585927.9710	141941.1260	18.9550	4.00	62.00	96.00	14.90	512.00	1.69		1
10F601	6585927.9710	141941.1260	18.9550	6.00	75.00	112.00	16.00	494.00	1.62		1
12A195	6585810.6960	142393.0530	18.0080	2.00	53.00	79.00	13.20	566.00	1.67	2472	1
12A195	6585810.6960	142393.0530	18.0080	4.00	61.00	88.00	15.00	339.00	1.65	3631	1
12A195	6585810.6960	142393.0530	18.0080	8.00	124.00	178.00	16.80	622.00	1.70	4844	1
12A195	6585810.6960	142393.0530	18.0080	10.00	143.00	180.00	16.80	772.00	1.69	7252	1
08T601	6585754.6290	142574.3538	19.6550	3.00	110.00	166.00	13.20	1145.00	1.74		1
08T601	6585754.6290	142574.3538	19.6550	5.00	79.00	116.00	12.80	556.00	1.69		1
08T601	6585754.6290	142574.3538	19.6550	7.00	92.00	139.00	13.70	1767.00	1.70		1
12A194	6585222.9480	142269.0100	25.4160	4.00	68.00	106.00	14.20	533.00	1.70	4570	1

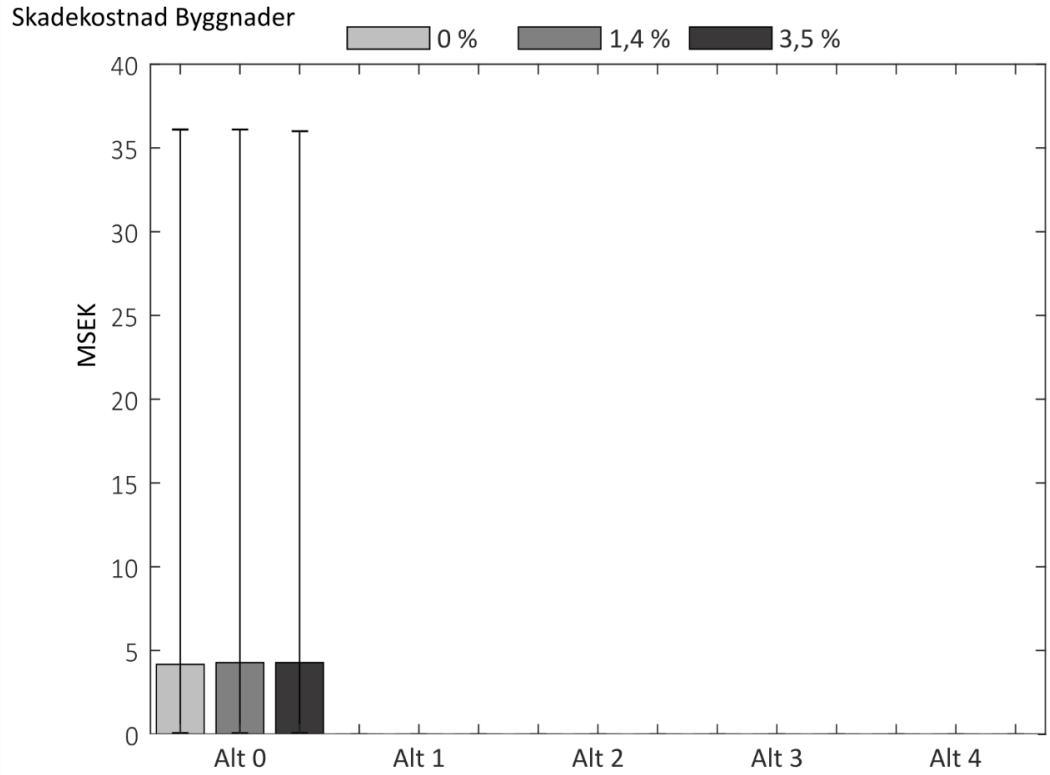
12A194	6585222.9480	142269.0100	25.4160	6.00	101.00	161.00	13.40	690.00	1.66	6680	1
08T605	6584948.8882	142343.3406	24.1550	6.00	83.00	123.00	15.40	798.00	1.71		1
08T605	6584948.8882	142343.3406	24.1550	7.50	105.00	157.00	17.30	1116.00	1.72		1
08T608	6584890.8280	141657.6312	16.1550	3.00	187.00	277.00	15.60	1900.00	1.87		1
08T608	6584890.8280	141657.6312	16.1550	4.00	93.00	115.00	16.50	170.00	1.78		1
08T636	6584586.5672	141605.1818	27.4550	4.00	120.00	167.00	16.70	789.00	1.74		1
08T636	6584586.5672	141605.1818	27.4550	6.00	89.00	121.00	17.00	371.00	1.73		1
08T609	6584575.9070	141975.3330	26.0550	4.70	156.00	178.00	16.00	684.00	1.77		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	2.50	68.00	126.00	15.50	1698.00	1.88		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	3.50	72.00	95.00	11.00	330.00	1.68		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	4.50	76.00	92.00	15.00	316.00	1.65		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	5.50	77.00	130.00	15.30	603.00	1.67		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	7.50	91.00	130.00	17.80	1099.00	1.71		1
09F532	6583978.6337	142176.9861	18.1550	9.50	168.00	209.00	21.50	1466.00	1.71		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	2.00	133.00	181.00	11.50	1494.00	1.80		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	3.00	100.00	153.00	14.90	1242.00	1.68		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	4.00	116.00	145.00	16.90	555.00	1.79		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	5.00	76.00	102.00	15.50	367.00	1.69		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	6.00	85.00	118.00	17.20	535.00	1.71		1
08F513	6583887.3264	141530.8264	22.5550	8.00	108.00	210.00	15.70	959.00	1.69		1
09W522	6583883.3802	142119.7377	18.4550	4.00	84.00	110.00	12.50	243.00	1.53		1
09W522	6583883.3802	142119.7377	18.4550	5.00	92.00	123.00	15.30	489.00	1.65		1
09W522	6583883.3802	142119.7377	18.4550	6.00	84.00	101.00	15.70	311.00	1.67		1
09W522	6583883.3802	142119.7377	18.4550	8.00	118.00	126.00	16.60	259.00	1.70		1
09F538	6583757.4366	142111.3741	18.6550	3.00	78.00	108.00	15.10	540.00	1.75		1
09F538	6583757.4366	142111.3741	18.6550	4.00	62.00	102.00	15.60	718.00	1.70		1
09F538	6583757.4366	142111.3741	18.6550	5.00	79.00	103.00	14.00	772.00	1.71		1
09F538	6583757.4366	142111.3741	18.6550	6.00	71.00	109.00	20.30	1136.00	1.77		1
08F505	6583738.9230	141724.6512	24.0550	3.50	253.00	618.00	6.20	6730.00	1.88		1

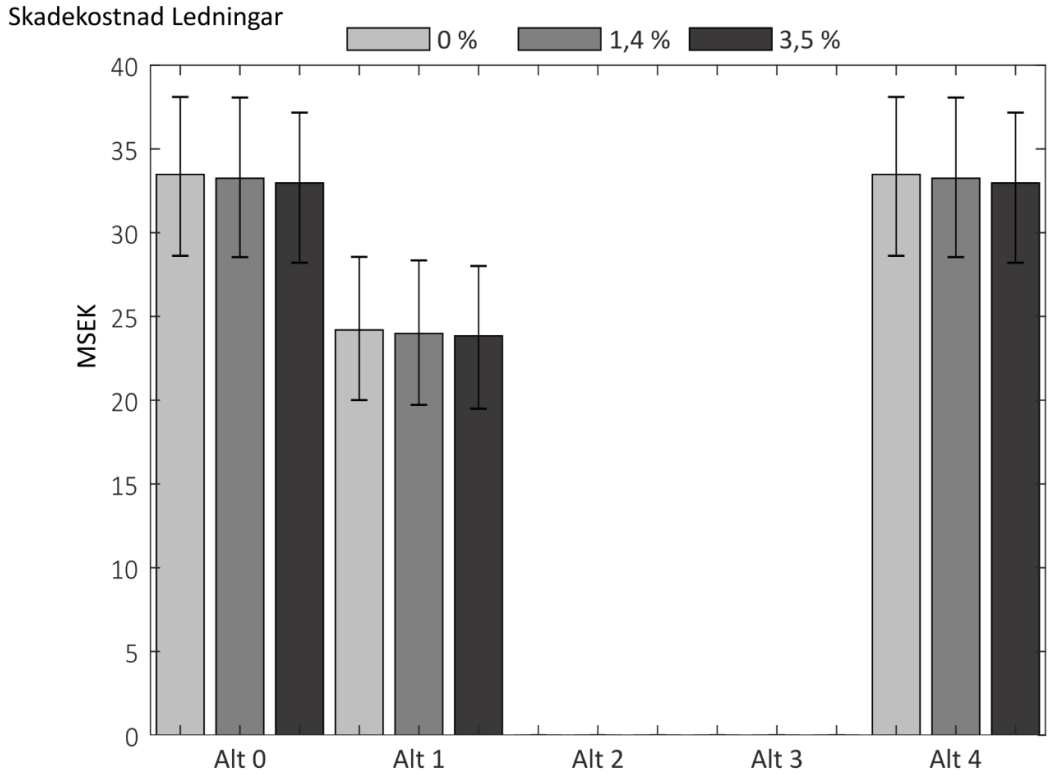
08F505	6583738.9230	141724.6512	24.0550	4.50	152.00	212.00	14.20	1127.00	1.80		1
08F505	6583738.9230	141724.6512	24.0550	5.50	115.00	163.00	16.10	696.00	1.81		1
09F549	6583671.3329	142096.0463	19.0550	3.00	153.00	239.00	12.20	1565.00	1.74		1
09F549	6583671.3329	142096.0463	19.0550	4.00	80.00	113.00	13.60	636.00	1.72		1
09F549	6583671.3329	142096.0463	19.0550	5.00	72.00	123.00	13.80	784.00	1.64		1
09F549	6583671.3329	142096.0463	19.0550	7.00	92.00	148.00	13.00	1230.00	1.73		1
08W536	6583324.7463	141212.1369	23.4550	4.00	158.00	209.00	17.50	1210.00	1.81		1
08W536	6583324.7463	141212.1369	23.4550	5.00	98.00	153.00	15.40	820.00	1.74		1
08W536	6583324.7463	141212.1369	23.4550	7.00	79.00	114.00	14.30	424.00	1.70		1
12A190	6583080.6100	141427.8260	17.0410	2.00	64.00	95.00	16.00	251.00	1.67	4324	1
12A190	6583080.6100	141427.8260	17.0410	4.00	87.00	114.00	17.40	444.00	1.79	4183	1
12A190	6583080.6100	141427.8260	17.0410	8.00	120.00	189.00	19.20	189.00	1.71	7792	1
12A190	6583080.6100	141427.8260	17.0410	12.00	230.00	290.00	18.20	794.00	1.71	12778	1
12A190	6583080.6100	141427.8260	17.0410	14.00	190.00	237.00	18.20	875.00	1.72	12179	1
08F262	6580831.7202	140911.5416	12.3550	2.00	73.00	123.00	13.30	828.00	1.66		2
08F262	6580831.7202	140911.5416	12.3550	3.00	61.00	120.00	13.20	703.00	1.63		2
08F262	6580831.7202	140911.5416	12.3550	4.00	54.00	79.00	18.70	173.00	1.62		2
08F262	6580831.7202	140911.5416	12.3550	5.00	57.00	94.00	17.80	303.00	1.66		2
08F262	6580831.7202	140911.5416	12.3550	6.00	65.00	109.00	17.10	283.00	1.59		2
08F295	6578759.8203	141143.0461	11.7550	1.50	42.00	71.00	13.10	568.00	1.66		2
08F295	6578759.8203	141143.0461	11.7550	2.50	29.00	51.00	13.80	237.00	1.58		2
08F295	6578759.8203	141143.0461	11.7550	6.50	61.00	100.00	14.70	371.00	1.74		2
08F293	6578486.1603	140954.3814	13.1550	2.00	85.00	116.00	12.50	539.00	1.65		2
08F293	6578486.1603	140954.3814	13.1550	3.00	70.00	92.00	15.60	256.00	1.66		2
08F293	6578486.1603	140954.3814	13.1550	4.00	71.00	93.00	14.10	278.00	1.62		2
09F078	6575439.5720	144669.0020	2.2550	2.00	39.00	64.00	12.20	697.00	1.66		3
09F078	6575439.5720	144669.0020	2.2550	3.00	47.00	110.00	14.10	501.00	1.54		3
09F078	6575439.5720	144669.0020	2.2550	4.00	47.00	76.00	12.80	337.00	1.58		3
09F078	6575439.5720	144669.0020	2.2550	5.00	49.00	77.00	15.00	524.00	1.61		3

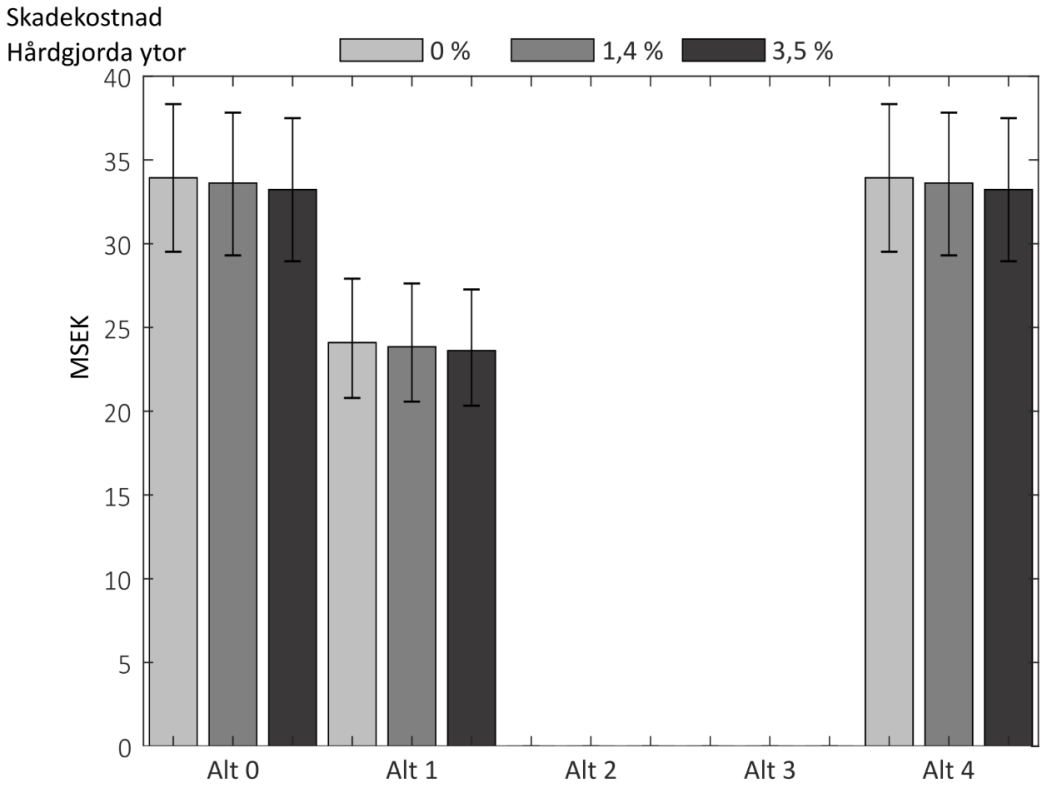
10F005	6574636.5800	144566.4560	21.4550	3.50	109.00	160.00	15.20	6900.00	1.70		3
10F005	6574636.5800	144566.4560	21.4550	4.50	86.00	163.00	18.70	5320.00	1.65		3
13A181	6574246.0880	144869.1950	32.9890	4.00	64.00	94.00	16.00	315.00	1.63	4651	3
13A181	6574246.0880	144869.1950	32.9890	6.00	77.00	111.00	16.70	377.00	1.59	8226	3
13A181	6574246.0880	144869.1950	32.9890	9.00	121.00	174.00	15.80	478.00	1.61	8288	3
13A182	6574223.2400	144842.2990	32.9700	3.00	58.00	105.00	14.20	443.00	1.57	5800	3
13A182	6574223.2400	144842.2990	32.9700	5.00	74.00	102.00	15.70	328.00	1.63	3578	3
13A182	6574223.2400	144842.2990	32.9700	7.00	99.00	144.00	15.50	359.00	1.60	6952	3
08F056	6574168.4826	144885.4762	32.7550	2.00	51.00	66.00	14.20	204.00	1.67		3
08F056	6574168.4826	144885.4762	32.7550	4.00	77.00	114.00	19.10	437.00	1.65		3
08F056	6574168.4826	144885.4762	32.7550	6.00	96.00	117.00	21.90	374.00	1.63		3
08F057	6574160.4918	144719.0199	34.4550	3.40	116.00	196.00	16.50	902.00	1.69		3
08F057	6574160.4918	144719.0199	34.4550	4.50	119.00	133.00	15.80	271.00	1.70		3
08F057	6574160.4918	144719.0199	34.4550	6.00	107.00	132.00	14.40	336.00	1.63		3
08F063	6574128.6191	144799.7454	10.9550	2.00	84.00	122.00	14.90	619.00	1.63		3
08F063	6574128.6191	144799.7454	10.9550	3.00	64.00	100.00	15.40	243.00	1.61		3
08F063	6574128.6191	144799.7454	10.9550	4.50	100.00	126.00	16.40	313.00	1.67		3
08F063	6574128.6191	144799.7454	10.9550	6.50	127.00	148.00	18.70	335.00	1.69		3
08F055	6574106.5330	144865.1180	32.8550	2.50	83.00	112.00	14.30	381.00	1.64		3
08F055	6574106.5330	144865.1180	32.8550	3.50	62.00	74.00	14.70	208.00	1.55		3
08F055	6574106.5330	144865.1180	32.8550	4.50	75.00	93.00	15.10	255.00	1.61		3
08F055	6574106.5330	144865.1180	32.8550	6.00	84.00	102.00	14.20	283.00	1.67		3
08F055	6574106.5330	144865.1180	32.8550	8.00	106.00	132.00	14.30	398.00	1.66		3
12A188	6574054.5200	145014.2940	33.8730	3.00	67.00	96.00	13.60	481.00	1.68	5456	3
12A188	6574054.5200	145014.2940	33.8730	8.00	106.00	130.00	15.80	288.00	1.63	7260	3
08F111	6574033.5108	145683.3651	33.6550	4.00	101.00	127.00	15.20	686.00	1.74		3
08F111	6574033.5108	145683.3651	33.6550	5.00	72.00	90.00	15.10	281.00	1.69		3
08F111	6574033.5108	145683.3651	33.6550	6.00	90.00	138.00	15.40	540.00	1.58		3
08F111	6574033.5108	145683.3651	33.6550	8.50	90.00	127.00	17.90	884.00	1.79		3

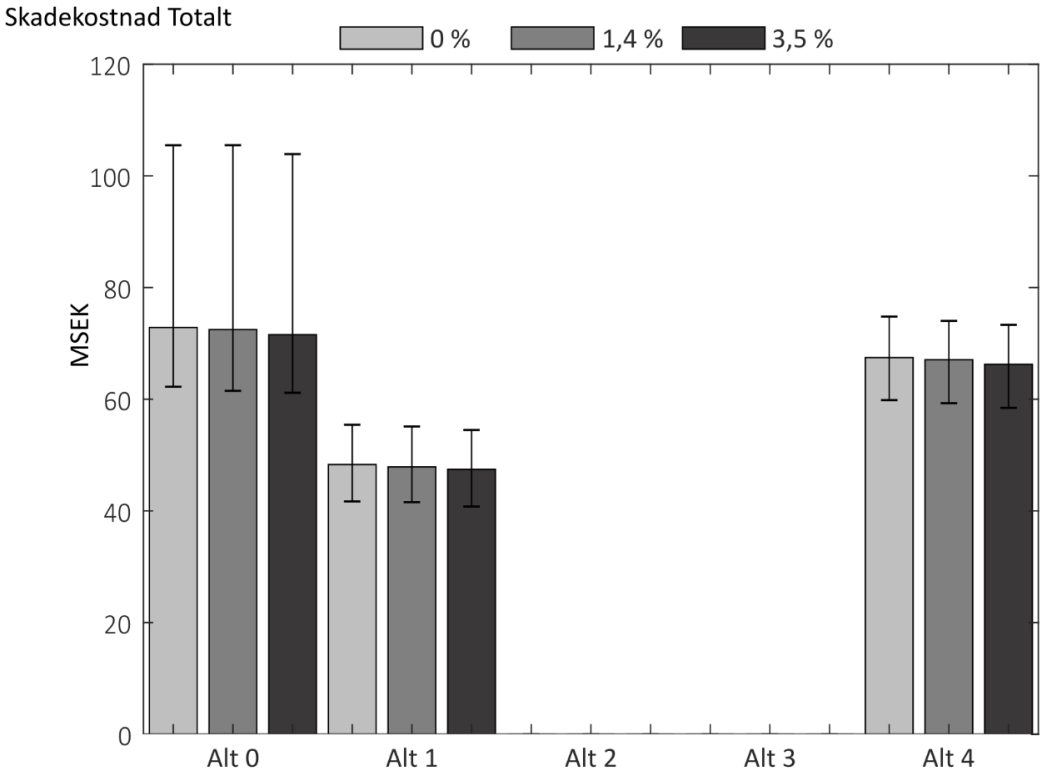
08F061	6573964.5263	144940.8744	33.2550	3.00	125.00	159.00	22.30	455.00	1.67	3
08F061	6573964.5263	144940.8744	33.2550	4.00	90.00	97.00	15.20	148.00	1.65	3
08F061	6573964.5263	144940.8744	33.2550	5.00	84.00	99.00	16.60	227.00	1.66	3
08F061	6573964.5263	144940.8744	33.2550	7.00	85.00	135.00	17.40	438.00	1.68	3
10F003	6573846.1670	145415.3890	38.9550	6.00	146.00	238.00	14.50	1505.00	1.72	3
08F059	6573484.5086	144988.1763	30.1550	3.50	186.00	289.00	11.70	2758.00	1.78	3
08F059	6573484.5086	144988.1763	30.1550	4.50	105.00	187.00	12.40	962.00	1.71	3
08F059	6573484.5086	144988.1763	30.1550	6.00	72.00	107.00	11.60	789.00	1.60	3
08F059	6573484.5086	144988.1763	30.1550	8.00	98.00	141.00	13.40	1173.00	1.63	3
08F060	6573066.6584	144884.2594	27.8550	3.50	52.00	110.00	14.80	894.00	1.74	3
08F060	6573066.6584	144884.2594	27.8550	4.50	62.00	91.00	12.10	541.00	1.72	3
08F060	6573066.6584	144884.2594	27.8550	5.50	78.00	117.00	13.30	686.00	1.71	3
08F060	6573066.6584	144884.2594	27.8550	7.50	78.00	89.00	16.90	207.00	1.68	3
09F076	6572724.1310	144948.3350	28.5550	3.50	100.00	153.00	12.50	829.00	1.72	3
09F076	6572724.1310	144948.3350	28.5550	4.50	81.00	141.00	13.70	773.00	1.78	3
09F076	6572724.1310	144948.3350	28.5550	5.50	91.00	131.00	15.20	728.00	1.69	3
09F076	6572724.1310	144948.3350	28.5550	6.50	85.00	127.00	14.20	672.00	1.67	3
09F076	6572724.1310	144948.3350	28.5550	8.50	109.00	186.00	13.30	1144.00	1.86	3
09F071	6572503.9250	144758.3010	31.7550	4.00	64.00	110.00	14.60	845.00	1.66	3
09F071	6572503.9250	144758.3010	31.7550	6.00	86.00	114.00	19.40	584.00	1.72	3
09F103	6572364.2527	144409.6203	36.9550	4.00	112.00	115.00	23.20	387.00	2.01	3
08F020	6572296.7729	144462.0382	36.5550	2.00	217.00	359.00	12.90	2860.00	1.82	3
08F020	6572296.7729	144462.0382	36.5550	3.00	81.00	137.00	15.10	956.00	1.84	3
08F020	6572296.7729	144462.0382	36.5550	4.00	59.00	107.00	16.70	1228.00	1.85	3

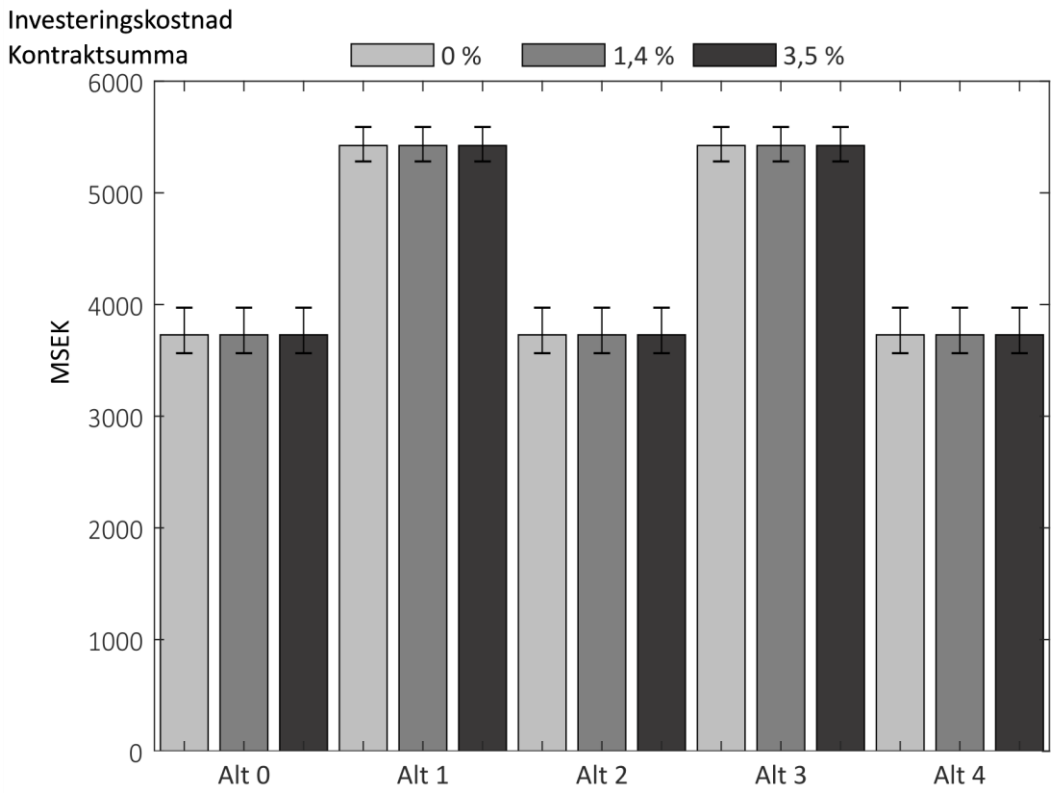
Appendix 2 – Skadekostnader och investeringskostnader

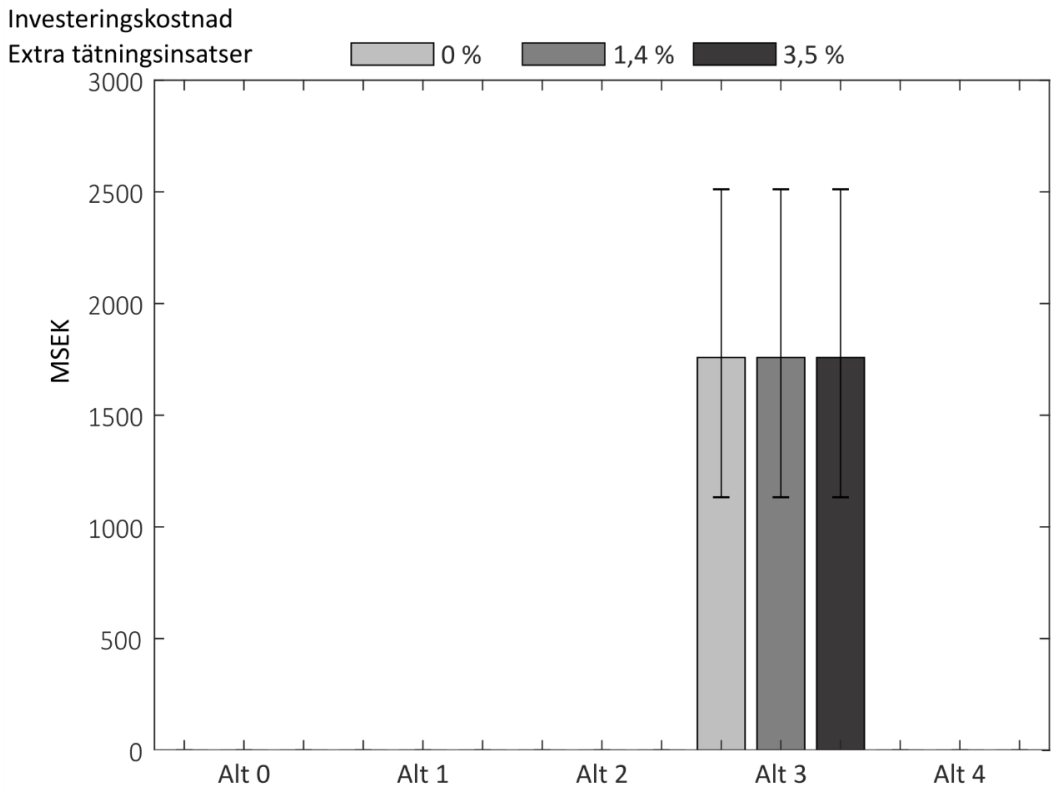


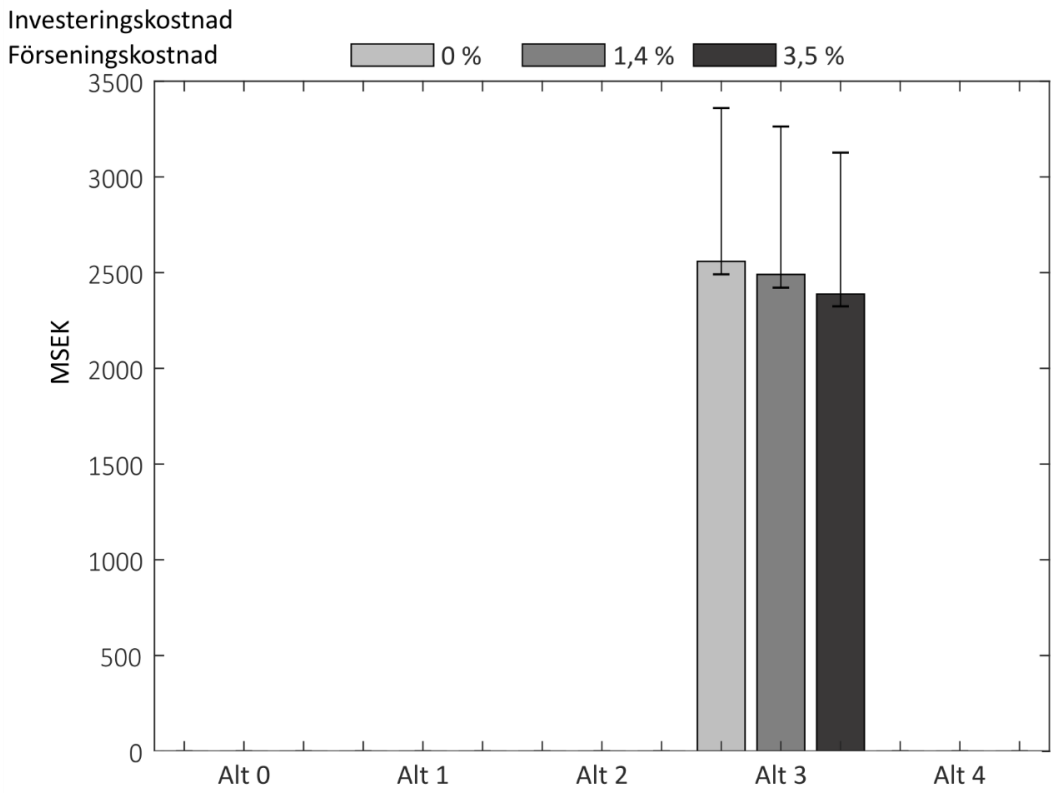


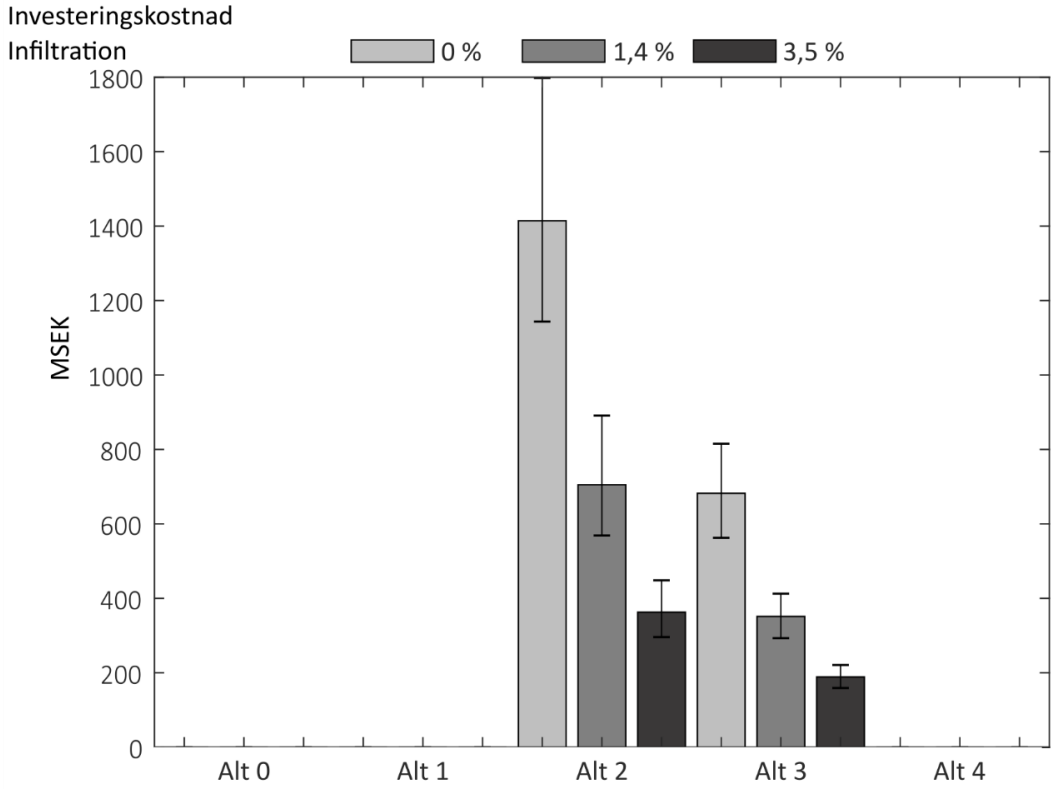

Skadekostnad
Hårdgjorda ytor
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4

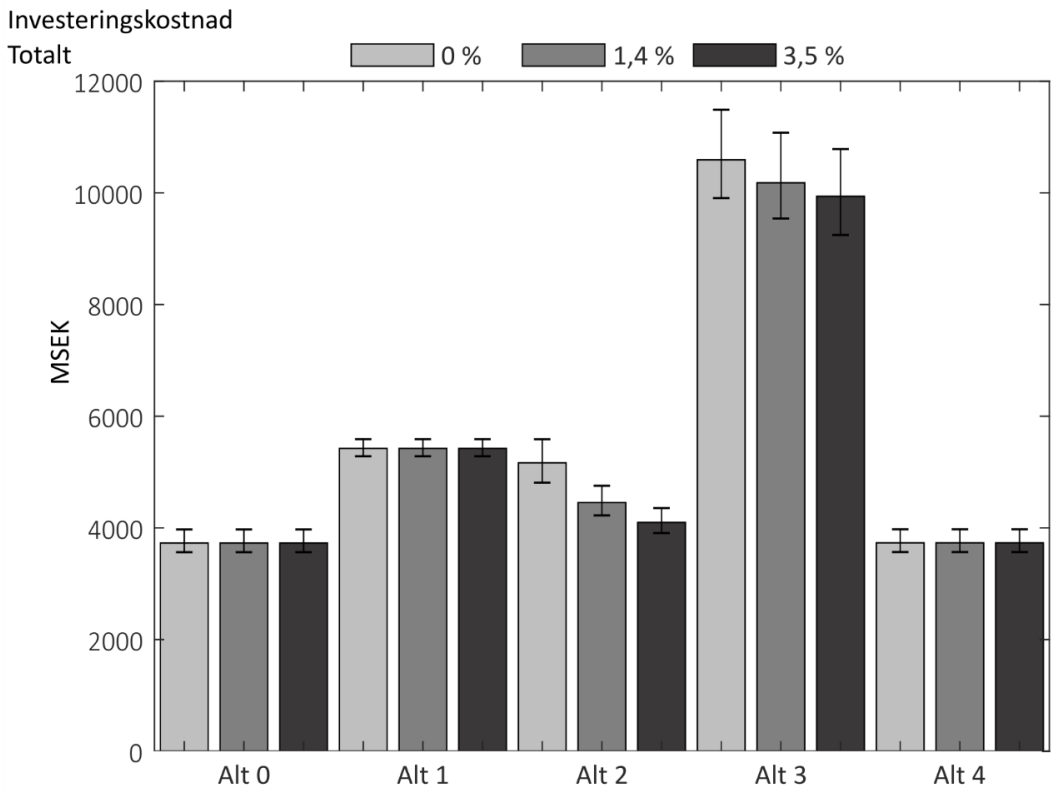

Skadekostnad Totalt
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
0
20
40
60
80
100
120
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4


Investeringskostnad
Kontraktsumma
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4


Investeringskostnad
Extra tätningsinsatser
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4


Investeringskostnad
Förseningskostnad
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4


Investeringskostnad
Infiltration
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4


Investeringskostnad
Totalt
0 %
1,4 %
3,5 %
MSEK
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Alt 0
Alt 1
Alt 2
Alt 3
Alt 4

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020
www.chalmers.se

CHALMERS