CHALMERS

TEKNISK SAMMANFATTNING

Kvantifiering av byggnadsskador på grund av undermarkskonstruktion i stadsskala

Hypotetiska fall av portryckssänkning i undre magasin

Teknisk sammanfattning för projekt TRV2020/54637

PIERRE WIKBY

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
Avdelningen för Geologi och Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

Kvantifiering av byggnadsskador på grund av undermarkskonstruktion i stadsskala – Hypotetiska fall av portrycks-sänkning i undre grundvattenmagasin

Teknisk sammanfattning av projekt TRV2020/54637

Samhällsbyggnadsteknik

PIERRE WIKBY

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Denna rapport sammanfattar de resultat och den utveckling av metodik som har uppnåtts inom ramen för projektet TRV2020/54637. I Skandinavien och även övriga delar av världen där lös lera utgör en betydande del av den geologiska lagerföljden, är risken för sättningar och sättningsskador stor på byggnadsverk och anläggningar i samband med grundvattenpåverkan. I samband med inläckage av grundvatten i en schakt eller tunnel, kan portryck i dessa leror sänkas vilket orsakar tidsberoende sättningar. Sådana risker kan hanteras, tex. genom tätning av schakt/tunnel för att motverka inläckage och genom återinfiltration för att återställa portrycksnivåer.

Underlag krävs för att kunna ta beslut om vilka skyddsåtgärder som är adekvata, och det blir då viktigt att förstå och kunna modellera de komplexa tids- och rumsberoende samband som systemet från grundvatteninläckage till sättningsskador utgör. I detta projekt görs det genom att sammankoppla flera modellansatser.

I detta forskningsprojekt har orsak-verkan-sambandet från grundvattenläckage till byggnadsskador via portryckssänkning samt sättningar undersökts. De initiala mark- och grundvattenförhållandena har undersökts och ställts upp i en hydro-mekanisk geomodell. Denna modell bygger på en grundvatten- och stratigrafimodell, en numerisk modell för 2D sättningssimuleringar samt extrapolering av sättningar till 3D via en maskininlärningsmodell (metamodell) tränad på 2D tvärsektioner. Till sist har även en byggnadsskademodell utvecklats som tar hänsyn till byggnadens deformation och sprickbildning för byggnader i stadsskala. Hypotetiska scenarier med uniform grundvattensänkning har undersökts som inte har någon koppling till förväntad grundvattensänkning i studieområdet. Resulterande skador kan därför ses som en indikation på vilka skador som kan uppkomma om man sänker grundvattennivåerna i sådan omfattning och inte som en riskprognos för det pågående undermarksprojektet inom området.

Nyckelord: sättningar, sättningsskador, lös lera, tunnlar, stadsskala, modellering

SUMMARY IN ENGLISH

This report summarizes the results and the methodology development that have been achieved within the project TRV2020/54637. In Scandinavia and other parts of the world where soft clay makes up a significant part of the stratigraphy, the risk of subsidence and consequent damage is high on buildings and utilities due to changes in groundwater pressure head conditions. In connection with groundwater leakage into an excavation/tunnel and resulting drop in groundwater pressure head, the pore pressure in these clays can be lowered, causing time-dependent subsidence. Such risks can be managed, e.g. by sealing the excavation/tunnel to prevent leakage and re-infiltration to restore pore pressure levels.

Support is required to decide which mitigation measures are adequate, which means it becomes important to understand and model the complex conditions and time and space dependent relationships of the cause-effect chain from leakage to subsidence damage. In this project this is done by coupling of several model approaches.

In this research project, the cause-effect relationship between groundwater leakage-pore pressure drop-settlement-building damage has been investigated and modelled. The initial soil and groundwater conditions have been investigated and set up in a hydro-mechanical ground model. This model is based on a groundwater and stratigraphy model, a numerical model for 2D settlement simulations and extrapolation of settlements to 3D via a machine learning model (metamodel) trained on 2D cross sections. Finally, a building damage model has been developed which considers deformation and cracking in buildings on city scale. Hypothetical scenarios of uniform groundwater drawdown unrelated to the actual expected drawdown were simulated in the study area. Resulting damage can therefore be seen as an indication of what damage might appear if the groundwater levels are lowered to such magnitudes and not as a risk prognosis for the ongoing sub-surface constructions in the area.

Keywords: settlement, settlement damage, soft clay, tunnels, city scale, modelling

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING 1
SUMMARY IN ENGLISH 2
FÖRORD 4
1 INLEDNING 5
1.1 Bakgrund 5
1.2 Syfte och mål med projektet 6
2 STUDIEOMRÅDE OCH DATA 8
2.1 Beskrivning av modellområdet 8
2.2 Data 8
2.2.1 Stratigrafisk modell för jordlager och bergnivå 9
2.2.2 Grundvattennivåer 9
2.2.3 Geomekaniska jordparametrar 9
2.2.4 Sättningsmätningar 9
2.2.5 Byggnader 10
3 METODIK 11
3.1 Simulerade scenarier 11
3.2 Hydrostratigrafisk modell 11
3.3 Kopplad FE-modell 12
3.5 Metamodell 12
3.6 Byggnadsskademodell 13
4 RESULTAT OCH DISKUSSION 15
4.1 Sättningsresultat 15
4.2 Känslighetsanalys 15
4.3 Metamodell 16
4.3 Byggnadsskador 17
5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER 18
6 REFERENSER 20

FÖRORD

Denna rapport sammanfattar de resultat och utveckling av metodik som har uppnåtts inom ramen för projektet TRV2020/54637.

Jag vill ytterst tacka min handledare och professor Minna Karstunen, professor Lars Rosén, samt dr. Jonas Sundell på SGI för sin handledning och värdefulla kommentarer. Jag vill även tacka Ola Forssberg på Trafikverket för ytterligare granskning samt för hjälp med publicering. Utan er hade denna rapport inte kunnat framställas. Dessutom vill jag tacka övriga medlemmar i projektet; dr. Ayman Abed, dr. Ezra Haaf, dr. Mats Karlsson och Johanna Merisalu för deras medverkan och expertis i projektet.

Till sist vill jag rikta stort tack till Trafikverket för huvudfinansiering av forskningsprojektet, samt Digital Twin Cities Centre (DTCC) via Vinnova för ytterligare finansiering.

Pierre Wikby
Göteborg april 2024

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Inläckage av grundvatten under byggnation samt drift av infrastruktur under mark kan ge upphov till sänkning av grundvattentryck (Figur 1). Inom områden med sättningskänsliga leror leder denna trycksänkning till marksättningar vilka utvecklas över tid. Sättningsförloppen innefattar både konsolidering och utveckling av krypsättningar. Dessa sättningar, speciellt ojämna differentialsättningar, kan leda till ökad belastning på byggnader och dess grundläggning samt annan infrastruktur inom influensområdet. För känsliga byggnader, exempelvis gamla byggnader i tegel, kan den ökade belastningen leda till sprickbildning vilket kan påverka både utseende, funktion och stabilitet hos byggnaden.

Vid beslut om riskreducerande skyddsåtgärder är det viktigt att balansera kostnader för dessa åtgärder mot åtgärdernas nytta i form av minskad risk för skador. Skyddsåtgärder innefattar exempelvis (1) tätning av tunnel och schakt för att förhindra läckage, (2) återinfiltration för att upprätthålla grundvattentryck och därmed begränsa sättningar, eller (3) grundförstärkning av särskilt känsliga byggnader (Sundell 2018).

Balansgången mellan kostnader och nyttor för åtgärder kompliceras av att prognosen för portryckssänkning, sättningar och därav uppkomna skador är förknippad med en mängd osäkerheter. Ett ramverk för att bedöma risker genom att modellera samtliga processer i orsaks-verkanskedjan (Figur 1) och dess ingående osäkerheter togs fram i samband med ett tidigare doktorandprojekt (Sundell 2018). Projektet som beskrivs i föreliggande rapport fokuserar på utvecklingen av modellverktyg för tidsberoende simulering av portryck, sättningar och skador, steg 3-5 i Figur 1. Verktygen behandlar de fysikaliska processerna i större grad än tidigare och bidrar därmed till en större träffsäkerhet i skade- och kostnadsprognoser.

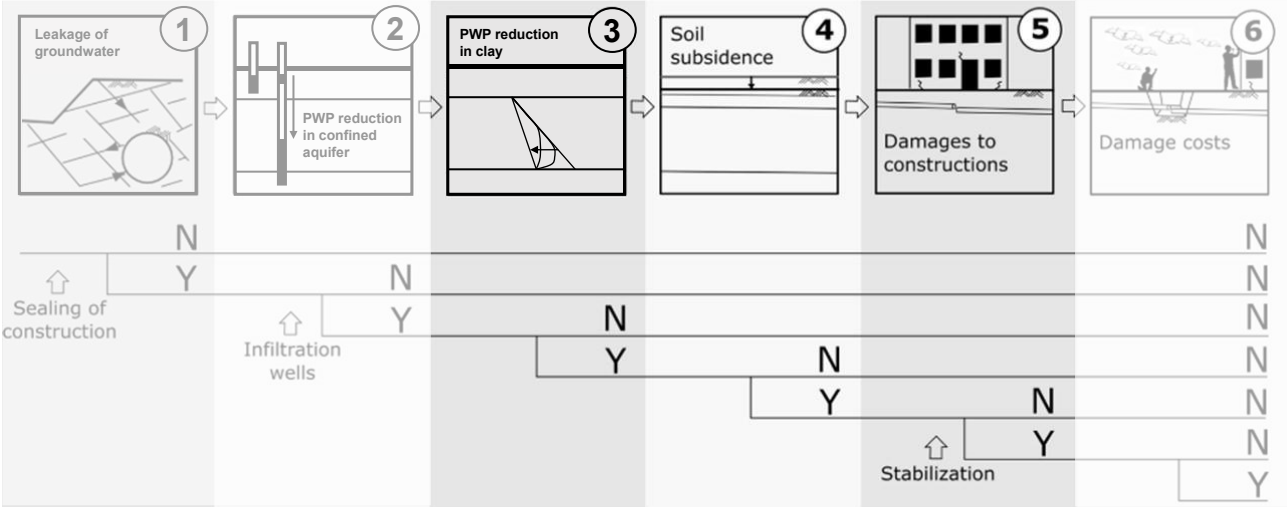
Exempel på osäkerheter är valet av parametervärden samt hur väl en sättningsmodell kan representera fysiken som styr systemet. Det första syftar till att representativa värden för parametrar är osäkra då det endast mäts i specifika punkter. Dessa ligger till grund för ett bedömt intervall för olika jordparametrar men dess spatiala representativitet är mycket svåra att bedöma då de geologiska förhållandena kan variera stort. Det andra syftar till de fysikaliska egenskaperna är mycket komplexa i lös sensitiv lera. Kompressionsegenskaperna hos den typen av lera kan bäst modelleras med avancerade materialmodeller som Creep-SCLAY1S (Sivasithamparam et al. 2015, Gras et al. 2017, Gras et al. 2018) vilken tar hänsyn till både anisotropi och sensitivitet vilket influerar både styvhet under belastning och krypning.

En tillämpning av Creep-SCLAY1S i det finita element-programmet PLAXIS 2D, som fullständigt kan koppla hydro-mekaniska samband mellan flöde och deformation, används därför för att modellera sättningar i vår metodik. Metodiken appliceras på stadsdelarna Haga, Vasastaden och Inom Vallgraven i centrala Göteborg, där en underjordisk järnvägsstation och tunnel byggs. Byggprojektets dataunderlag (avsnitt 2.2) bedöms vara tillräckligt bra för att lokalt bestämma relevanta modellparametrar i sättningsberäkningarna. Den rumsliga variationen har i viss del undersökts genom data från det närliggande Götatunnelprojektet (Tornborg et al. 2021). För att behandla de osäkerheter som är ett resultat av de betydande naturliga variationerna i olika parametrar har en känslighetsanalys genomförts för ett antal modellkombinationer, se avsnitt 3.3.

Eftersom problemet med inläckage kan skada byggnader över ett stort område med exempelvis varierande stratigrafi så bör även sättningsmodellen anpassas till skalan för detta område. Eftersom 3D Finita element- (FE) modeller generellt är mycket datorkapacitetskrävande och därmed inte alltid praktiskt genomförbara har istället en mer beräkningsmässigt effektiv metamodell utvecklats, se avsnitt 3.4. En metamodell eller surrogatmodell är en approximativ modell av en detaljerad numerisk modell (Blanning, 1975). Metamodellen hittar genom upplärning av en maskininlärningsalgoritm samband mellan modellerna för stratigrafi och grundvattennivå med den numeriska beräkningen av sättningens storlek. Därefter kan metamodellen skatta sättningen över hela området.

Dock räcker inte information om sättningarna för att uppskatta skador. Även om de är stora så behöver det nödvändigtvis inte betyda att byggnader tar skada om sättningarna är lika stora utmed hela grundläggningen för en byggnad, se exempelvis Grant et al. (1974). Dessutom är byggnader olika känsliga beroende på geometri, material, sättningsprofilens variation, konstruktionstyp, grundläggningstyp etc., vilket gör att bedömning av skada på varje byggnad bör beaktas separat. I detta projekt har därför en storskalig byggnadsskademodell utvecklats där olika byggnadsskadeparametrar bestäms, exempelvis vinkeländring (en: angular distortion) och dragtöjning (en: limiting tensile strain), och jämförs med olika skadekriterier, se exempelvis Son and Cording (2005) och Burland et al. (1995).

Figur 1 sammanfattar processen från inläckage till skadekostnader. För process 3 och 4, reduktion av portryck och marksättningar, har en geomekanisk modell tillämpats PLAXIS 2D. Sättningsresultat från PLAXIS extrapoleras sedan genom en metamodell i hela modellområdet. För process 5, skador på byggnader beräknas skador genom en byggnadsskademodell.



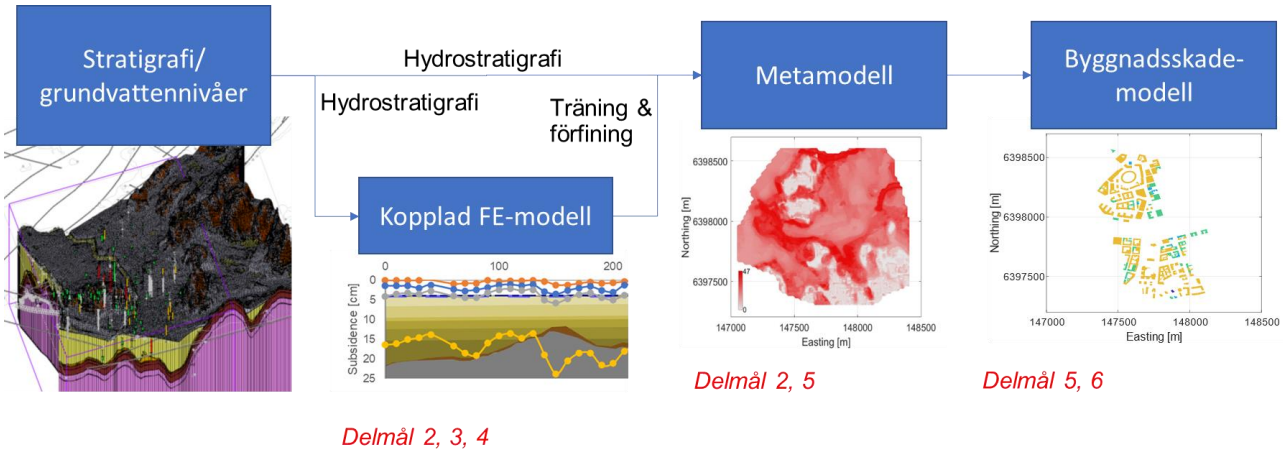
Figur 1. Orsak-verkan-kedjan i projektet. Nedre delen visar ett händelseträd där N = nej och Y = ja. Modifierad från Sundell (2018).

1.2 Syfte och mål med projektet

Övergripande mål för projektet var att bestämma till hur mycket, samt hur länge en grundvattensänkning kan pågå utan att betydande skador på byggnader sker samt att utveckla en modellmetodik för detta ändamål. För att uppnå projektets övergripande mål sattes sex specifika aktiviteter:

1) Litteratur- och intervjustudie av metoder inom vetenskap och bransch, nationellt och internationellt.
2) Konceptuell hydrogeologisk och geoteknisk 3D-modellering som bas för avancerade 2D-analyser om tidsberoende markdeformationer.
3) Bedömning av ingående parameterosäkerhet, speciellt estimering av lerans hydrauliska konduktivitet i olika riktningar.
4) Systematiska känslighetsanalyser i 2D för att uppskatta den tidsberoende omfattningen av maximalt influensområdet för grundvattensänkning och markdeformationer (i bygg- och driftsfas).
5) Kartläggning av byggnader och fundament i influensområdet för att göra preliminära numeriska 3D-analyser med hänsyn till byggnadernas relativa styvhet och fundamentets inverkan på flöde och markdeformationer.
6) Utifrån ovanstående, utveckling av en strukturerad metod för uppskattning av sannolikhet för olika grad av skada för riskanalys i enlighet med den struktur för risk- och beslutsanalys som finns framtagen från tidigare forskningsprojekt.

Aktivitet 1 har realiserats i form av en mittseminarierapport, vilken ligger till grund för en avhandling som förväntas presenteras år 2025, samt en intervjustudie med referensgrupp i projektet där frågor om vilka metoder som används i branschen idag samt vilka utmaningar som kan finnas vid en implementering av modellmetodiken i branschen diskuterades. Delmål 2 realiserades i form av en konceptualisering av en kopplad finita element-modell samt en metamodell beskriven i Haaf et al. (in preparation). Delmål 3-4 har realiserats i form av en känslighetsanalys beskriven i Wikby et al. (2023). Delmål 5 har delvis uppnåtts i och med en utvecklad byggnadsskademodell beskriven i Wikby et al. (2024). Dock har inte relativa styvheten och fundamentet beaktats ännu. Delmål 6 har även den delvis uppnåtts med förenklad uppskattning av sannolikheten i sättningsberäkningarna. Figur 2 beskriver den föreslagna modellmetodiken samt vilken modell varje delmål är kopplat till.



Figur 2. Redan utvecklade och pågående utveckling av modeller.

2 STUDIEOMRÅDE OCH DATA

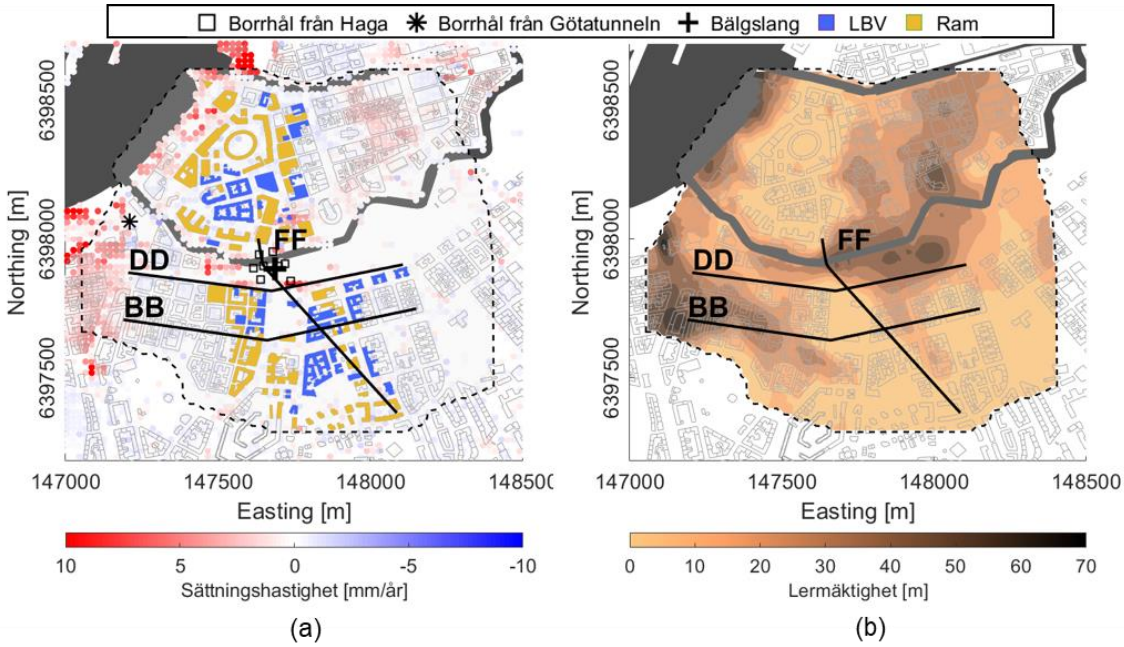
2.1 Beskrivning av modellområdet

I projektet har en metodik utvecklats där användningen för denna illustreras med hjälp av data från pågående byggnation av station Haga som är en del av Västlänken-projektet, Göteborg. Tunneln och stationen byggs i både lera och berg. Modellområdet tillhör det avrinningsområde som är begränsat enligt Figur 3. Geologin i området är bildad av naturliga processer men påverkad av mänskliga aktiviteter genom byggnation under de senaste 400 åren. Berget består av hårt kristallint berg (i huvudsak gnejs) som är uppsprucket i dess överyta och starkt kuperat. Ovanför vilar ett tunt lager av permeabelt friktionslager (morän och i vissa fall glacifluvialt avsatt sand och grus) avlagrat under senaste istiden, följt av relativt homogen lös lera som formades under och efter istiden i marina miljöer vars tjocklek är kraftigt varierande där berg i dagen kan förekomma lokalt (Trafikverket 2014).

Den översta delen av leran utgörs av torrskorpelera som antas vara permeabel. Över leran kan, särskilt i områden nära höjdpartier, svallsand förekomma. Också organiska jordarter (torv) kan förekomma. Ett lager av fyllning bestående av bland annat utgrävt material från Göta Älv och Rosenlundskanalen finns i de ytligaste delarna (ca 1-2 m i tjocklek). En tidigare stadsvall har funnits i området som nu är demolerad (Trafikverket 2014).

2.2 Data

Data som är använda för modellerna visas i figur 3. Borrhål från studieområdet (Haga) har tagits upp för vilka geomekaniska standardtester har utförts för att utvärdera jordegenskaperna. Vi visar även den ungefärliga lokalen för de provpunkter för vilka tester har utförts i samband med Götatunnel-projektet. Figur 3(a) visar även de byggnader som har använts i skadeanalysen, där byggnaderna först indelades i konstruktionstyp: Lastbärande väggar (LBV) och ramkonstruktion (Ram).



Figur 3. Data använda i studien. a) Borrhåls-, mät- och byggnadspolygondata, b) stratigrafiska data för lermäktighet.

2.2.1 Stratigrafisk modell för jordlager och bergnivå

I området har sonderingar gjorts för att skapa en stratigrafi i området med 4 lager, i ordningsföljd uppifrån och ner: fyllnadsmaterial, lera, morän och kristallint berg med olika uppspruckenhet. Uppspruckenheten antas vara högre i ytligare bergskikt och i bergets deformationszoner jämfört med kringliggande och djupare bergskikt. Stratigrafin modellerades med en kriging-baserad metod beskriven i Sundell et al. (2016). Data kommer från både JB-sonderingar och sonderingar som inte går ner i berg, exempelvis CPTer. Den stratigrafiska modellen är utlagd som ett rutnät och har en upplösning på 5x5m. Osäkerheter i modellerad stratigrafi kan beaktas i kriging-modellen men studeras inte närmare i denna studie. Tidigare studier visar att osäkerheter i lagertjocklek i modellerad stratigrafi kan uppgå till flera meter där osäkerheterna ökar på avstånd från sonderingarna som modellen baseras på (Sundell et al. 2016).

2.2.2 Grundvattennivåer

Grundvattennivåer från 129 brunnar i undre och övre magasin har använts för att simulera grundvattennivåytor. Dessa ytor modellerades med hjälp av en stationär grundvattenmodell i MODFLOW där PEST (Parameter ESTimation code) har använts för att kalibrera modellen mot antagna medelgrundvattennivåer, se exempelvis Sundell et al. (2019). Dessa antas vara de initiala nivåerna innan avsänkning sker.

Grundvattenmodellen i MODFLOW används emellertid inte för att simulera avsänkta grundvattennivåer från en undermarksanläggning. Istället antas uniforma avsänkningar för det undre grundvattenmagasinet och inte någon avsänkning i det övre grundvattenmagasinet. Med undre grundvattenmagasin menar vi de permeabla skikten under leran. Detta antagande gjordes eftersom den vidare modelleringen syftar till att undersöka storleksordningen på grundvattensänkningar utan att skador uppkommer.

I själva verket varierar den potentiella avsänkningens storlek från en undermarksanläggning inom området. Avsänkningen kan även ske i övre grundvattenmagasin samt i lokala permeabla skikt i leran beroende av om hydraulisk kontakt finns mellan undre magasin och övre magasin eller de lokala permeabla skikten i leran.

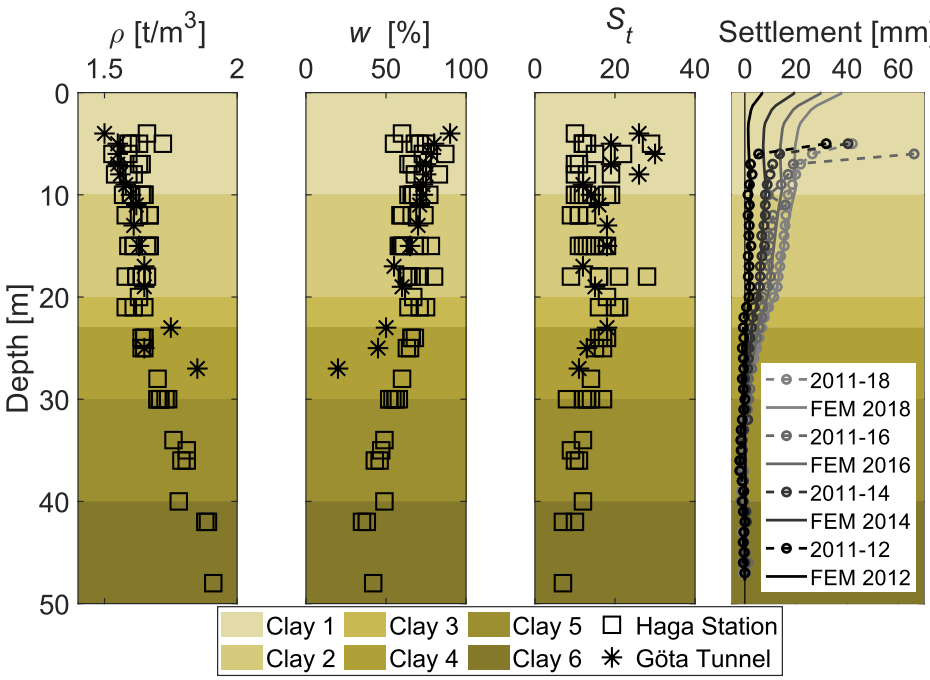
2.2.3 Geomekaniska jordparametrar

Jordegenskaperna är utvärderade för åtta borrhål runt schakten vid Rosenlundskanalen (figur 3) och kan ses i figur 5. De utvärderade jordegenskaperna för Haga station samt skiktindelning av leran visas i Figur 4. Utöver det har CRS-försök använts för att ta fram den vertikala hydrauliska konduktiviteten samt överkonsolideringsgraden (OCR). Eftersom en avancerad jordmodell, Creep-SCLAY1S har använts, har även jordegenskaper från den närliggande Götatunneln (Tornborg et al. 2021) plottats och jämförts i samma figur. Då de två lokalerna bedöms ha liknande egenskaper har modellparametrar för Creep-SCLAY1S tagits från Tornborg et al. För CRS-försöken har även kvaliteten på mätningen bestämts med figur 4a i SGI information 3 (Larsson et al. 2007). Den visar att CRS utförda på prov under 20 meter generellt är av dålig kvalitet medan resten har en någorlunda kvalitet (Figur 5).

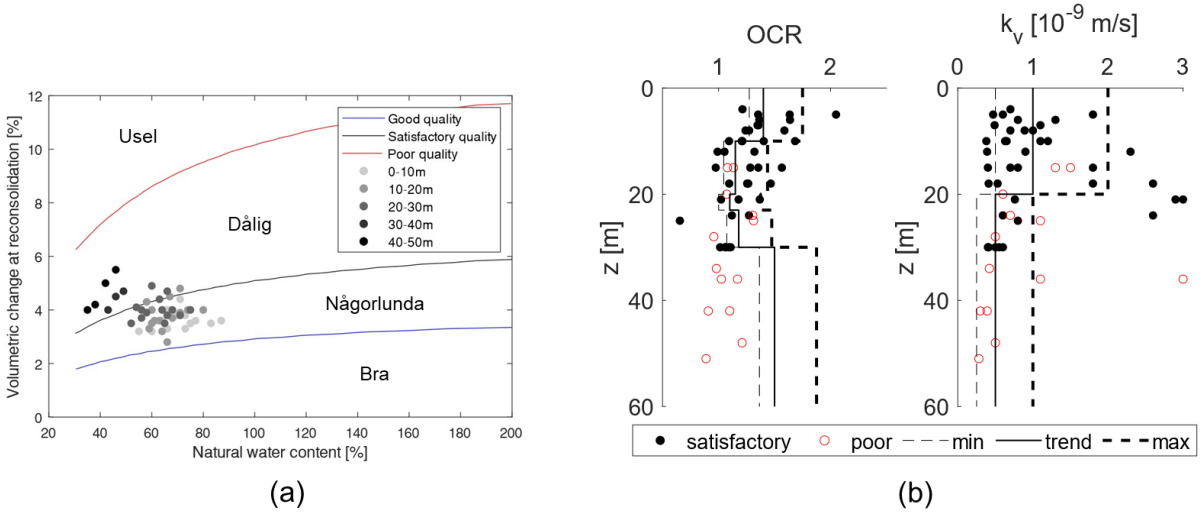
2.2.4 Sättningsmätningar

De sättningsmätningarna som har använts är en bälgslang samt InSAR. Bälgslangen är placerad kring Rosenlundsschakten (Figur 3) och mäter stegvisa sättningar över djupet. Bälgslangsmätningar (Figur

4) har använts för kalibrering av den hydromekaniskt kopplade finita element- (FE) modellen, beskriven i sektion 3.3. På grund av den dåliga kvaliteten av CRS-försöken på större djup, kalibrerades modellens OCR med hjälp av bälgslangen. Figur 4 visar därför även denna kalibrering.



Figur 4. Indexparametervärden för prover från Haga station och Götatunneln, samt modellkalibrering mot bälgslangsmätningar. Modifierat från Wikby et al. (2023).



Figur 5. a) Provkvalitetsbedömning för CRS från Haga med SGI information 3 (Larsson et al. 2007). b) Deriverat OCR och k_v med bedömda trend-, min- och max-värden för känslighetsanalysen. Modifierat från Wikby et al. (2023).

2.2.5 Byggnader

En sammanställning av inventeringar av byggnader i området, dess grundläggning, konstruktionstyp, byggnadsmaterial, antal våningar och skadenivå hämtades från Trafikverkets databas och visas i Figur 3. En grov indelning gjordes för lastbärande väggar (LBV) och ramkonstruktioner (Ram) för beräkning av en av skadeparametrarna; dragtöjning (Läs Burland and Wroth (1974) för detalj). Totalt gjordes inventeringar för 215 byggnader i området.

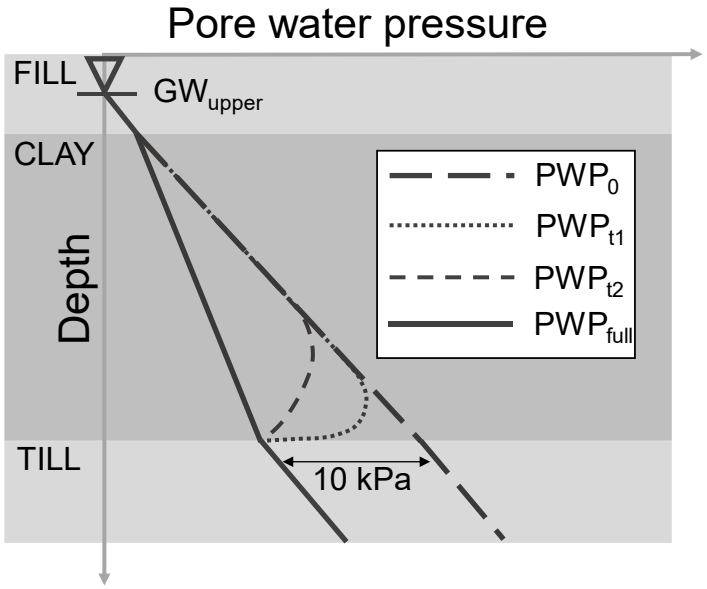
3 METODIK

3.1 Simulerade scenarier

För att undersöka effekten av en uniform avsänkning i det undre grundvattenmagasinet, modellerades portryckssänkning enligt Figur 6. Där antas att portryckssänkningen, som induceras av inläckaget, inte påverkar piezometriska nivåer i det övre grundvattenmagasinet (fyllnadsmaterialet). Samtidigt sker en snabb portryckssänkning i det undre magasinet (morän) följt av en enkelsidig dränering av lerlagret ned till magasinet som är tidsberoende, s.k. underdränering. Portrycksprofilen (PWP) utvecklas för tiderna 0, t1 och t2 till full konsolidering har uppnåtts (PWP_{full}) och kan då konceptualiseras enligt figur 6.

De scenarier som har valts för analyser är portryckssänkning i undre magasin på 10 kPa och 40 kPa (dvs. 1 och 4 meter vattenpelare), samt efter konsolideringstiderna 1 år och 30 år. Portryckssänkningen 40 kPa valdes eftersom den bedöms vara mycket konservativ då de baseras på inläckage till otäta tunnlar och 10 kPa för jämförelse. I verkligheten tätas tunnlarna med injektering och grundvattennivåer upprätthålls genom infiltration. Även om det är osannolikt att dessa scenarier inträffar i verkligheten, visar modellerna upp känsligheten för störning i olika delar av modellområdet om inga skyddsåtgärder implementeras.

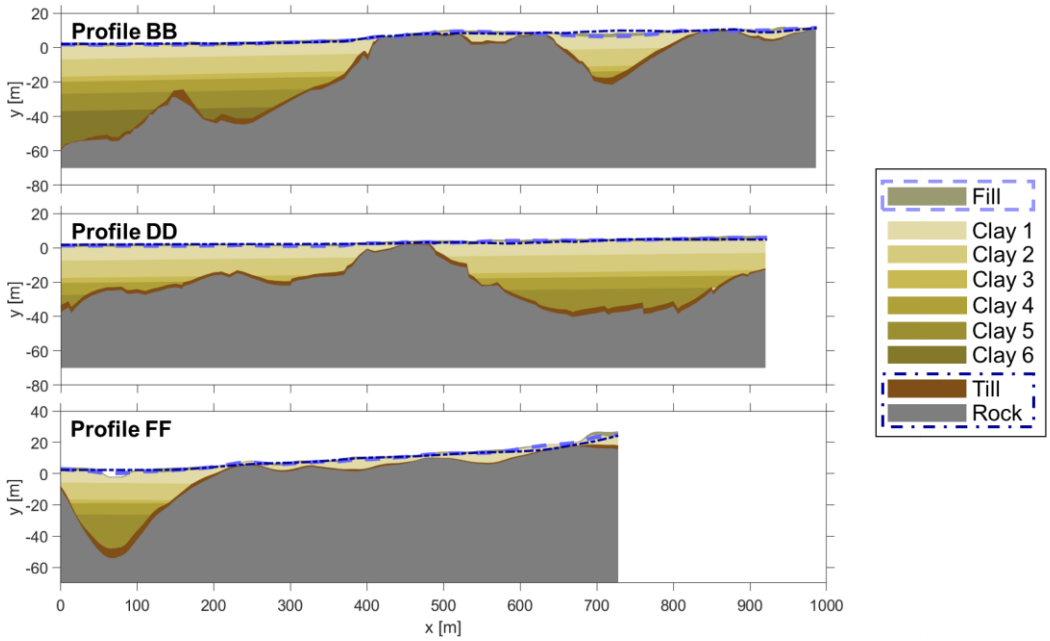
Utöver dessa scenarier simulerades även konsolideringsförloppet utan portryckssänkning, dvs. endast med krypning för jämförelse.



Figur 6. Porvattentrycksänkning i lera genom underdränering. Modifierad från Wikby et al. (2023).

3.2 Hydrostratigrafisk modell

Den hydrostratigrafiska (=stratigrafi och grundvattennivå) modellen är beskriven i avsnitt 2.2.1 och 2.2.2. Från hydrostratigrafin över hela domänen togs hydrostratigrafin fram för tre tvärsektioner (Figur 7), vars geografiska lägen visas i figur 4. I denna rapport exemplifieras resultat från tvärsektion BB. Resultat för de övriga sektionerna redovisas i Haaf et al. (submitted) och Wikby et al. (2023b), där liknande resultat redovisas baserat på hydrostratigrafin i varje x-koordinat.



Figur 7. Tvärsektion BB, DD och FF och dess hydrostratigrafi. Modifierad från Haaf et al. (in preparation).

3.3 Kopplad FE-modell

En avancerad finit element-modell (Wikby et al. 2023, Haaf et al. in preparation) sattes upp i PLAXIS 2D för att ta hänsyn till (1) geometriska skillnader i stratigrafin, (2) flerdimensionaliteten av problemet (i detta fall användes en 2D-modell istället för 3D då den senare är beräkningsmässigt mycket tyngre), (3) hydromekaniskt kopplade samband mellan deformationer och portryck, samt (4) typiska kompressionsegenskaper hos lösa sensitiva leror (exempelvis krypning, anisotropi och sensitivitet). Lerlagren delades in i horisontella skikt med unika överkonsoliderings (OCR)-, permeabilitets-, densitets- och portalsvärden enligt parameteruppställning i Tornborg et al. (2021). De simulerades med materialmodellen Creep-SCLAY1S (läs exempelvis Gras et al. (2017)) som kan ta hänsyn till de typiska kompressionsegenskaperna.

En parameterstudie av modellen på tvärsektion BB beskrivs i detalj i Wikby et al. (2023). Där studerades känsligheten på OCR samt den vertikala hydrauliska konduktiviteten vilka värden visas i figur 5, samt den horisontella hydrauliska konduktiviteten. Den senare antogs vara en produkt av den vertikala konduktiviteten multiplicerat med en faktor r_k som antogs ligga mellan 1 och 2, vilka värden baseras på studier på relativt homogen (ej varvig) marin lera, exempelvis Tavenas et al. (1983) och Win et al. (1998).

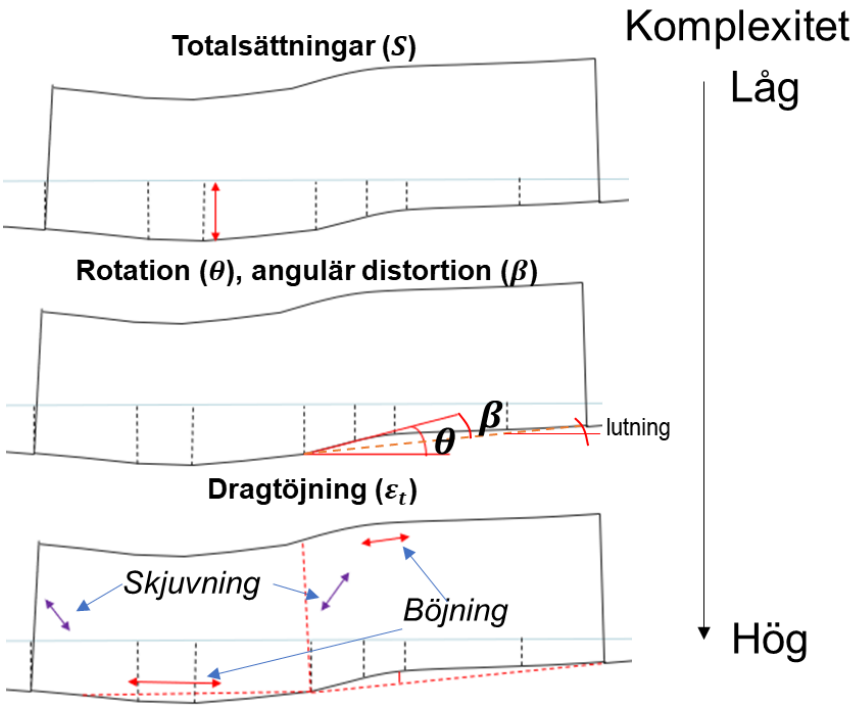
3.5 Metamodell

För att extrapolera resultaten från de tre tvärsektionerna byggdes en metamodell som beskrivs i detalj i Haaf et al. (in preparation). Motivering till att en metamodell använts och inte en numerisk 3D modell är att den senare kräver väldigt mycket datorkapacitet och är därför inte praktiskt genomförbar över en större skala med befintliga programvaror. Genom upplärning av en maskininlärningsalgoritm, hittar metamodellen samband mellan modellerna för stratigrafi och grundvattennivå med sättningens storlek. Sedan kan metamodellen skatta sättningen över hela området där en stratigrafi- och grundvattennivåmodell har upprättats. Trots att modellen inte har en fysikalisk formulering visar metamodellen höga korrelationsfaktorer (R^2 mellan 0,7 – 0,9) mot FE-modellen. Dessutom har metamodellen verifierats via så kallade Shapley-värden där varje parameters inflytande på resultatet

undersökts där sambanden visar sig vara fysikaliskt rimliga. Vid användning av metamodellen är det viktigt att veta att dess noggrannhet beror på mängden träningsdata, vilken är relevant endast för det specifika fallet. Precis som för statistiska modeller ska extrapolering inte göras utanför spannet för träningsdata. Om andra geologiska och hydrogeologiska förhållanden gäller bör en ny metamodell tränas upp.

3.6 Byggnadsskademodell

För att undersöka den faktiska effekten av sättningar på byggnader upprättades en byggnadsskademodell som presenteras i detalj i Wikby et al. (2024). Modellen tar resultaten från metamodellen (se 3.5) samt geometrisk och strukturell information ifrån byggnaden (se 2.2.5). Modellen har upprättats i MATLAB där byggnaderna representeras som polygoner och beräknar byggnadsskadeparametrarna som visas i figur 8 på sektioner av konstanta x- och y-värden som baseras på rutnätet från den stratigrafiska modellen. Det maximala värdet i varje polygon för varje parameter jämförs sedan med skadekriterier, se Tabell 1. De specifika skadekriterierna är Rankin (1988), State of Strain Method (SOSM) från Son and Cording (2005) och Limiting Tensile Strain Method (LTSM) från exempelvis Burland et al. (2004).



Figur 8. Skadeparametrar totalsättning (S), rotation (θ), angulär distortion (β), och dragtöjning (ε_t). Modifierad från Burland and Wroth (1974). Låg komplexitet innebär att få parametrar/ekvationer används och vise versa.

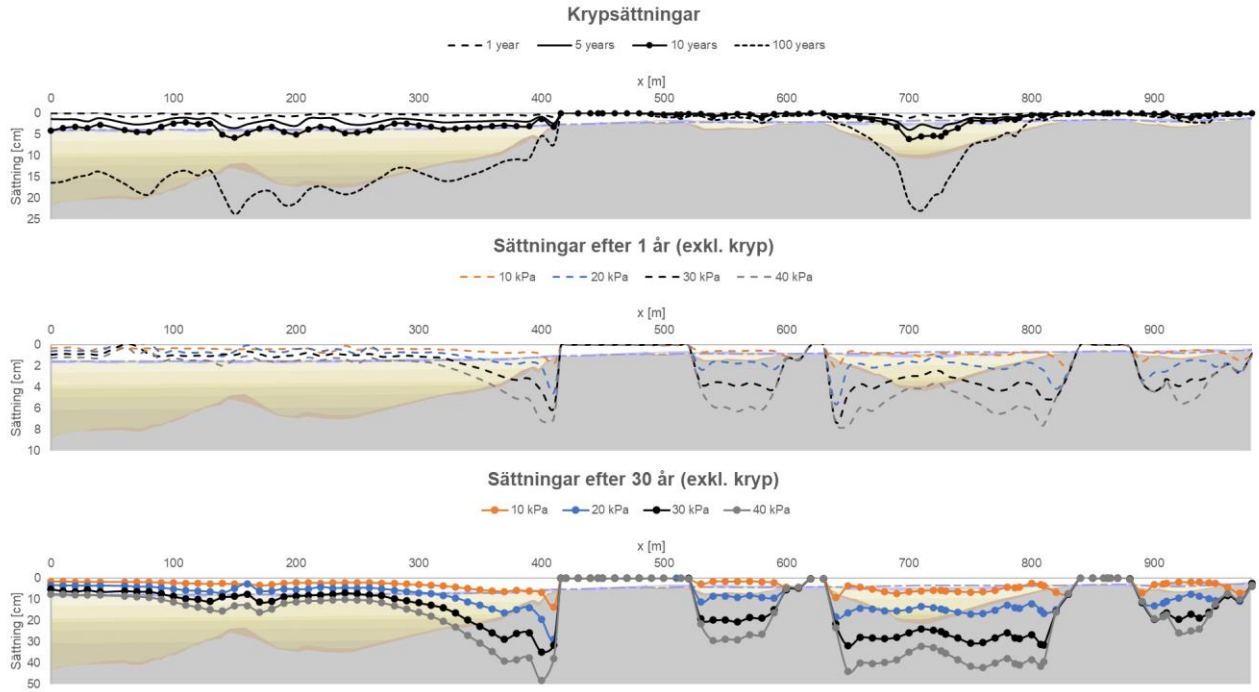
Tabell 1. Skadeklasser och skadekriterier (Modifierad från Burland et al. (1977), Rankin (1988), Son and Cording (2005) och Burland et al. (2004).

Skadeklass	**Beskrivning av skada, Reparationslättnad**	**Ungefärlig sprickvidd [mm]**	**Rankin(S) [mm]**	**Rankin(θ)**	**SOSM(β) [x10^-3]**	**LTSM(ε_t) [%]**
Hög	Partiell eller fullständig ombyggnation	>15	>75	>1/50	>6.67	>0.3 [%]
Måttlig	Omspackling av fasad kan behövas göras	5-15	50-75	1/200-1/50	3.33-6.67	0.15-0.3
Låg	Lättfyllda sprickor	1-5	10-50	1/500-1/200	1.5-3.33	0.075-0.15
M. Låg	Fina lätthanterliga sprickor	0.1-1	-	-	1-1.5	0.05-0.075
Försumbar	Hårfina sprickor	0-0.1	0-10	0-1/500	0-1	0-0.05

4 RESULTAT OCH DISKUSSION

4.1 Sättningsresultat

Figur 9 visar sättningsresultaten för olika portryckssänkningsfall efter olika konsolideringstider för en av tvärsektionerna (BB). Det viktigaste resultatet som visas här är att sättningarna är som störst kring övergångszonerna mellan lera och berg. Detta resultat beror delvis på den relativt korta dräneringslängden och delvis på att sättningens storlek beror på överkonsolideringsgraden (OCR). OCR bestämmer storleken på de viskoplastiska deformationerna (som utgör majoriteten av deformationer), vilka är mer känsliga på grundare djup än större pga lägre effektivspänning på dessa djup. Tillsammans med de modellerade initiala effektivspänningarna σ_0', som ökar med djupet, utgör dessa parametrar det modellerade spänningsintervallet upp till förkonsolideringstrycket (en. "pre-overburden pressure", $POP = (OCR - 1)\sigma_0'$). Om portryckssänkningen vid en viss konsolideringstid är relativt liten i förhållande till det modellerade POP, innebär det inga till små utvecklade viskoplastiska deformationer och vice versa.



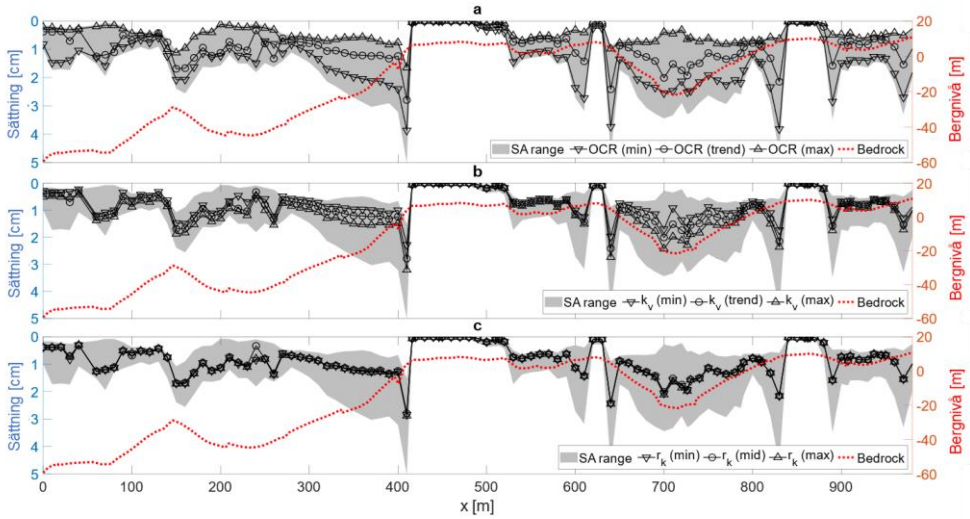
Figur 9. Sättningar från bakgrundskrypning och olika portryckssänkningsfall för tvärsektion BB.

4.2 Känslighetsanalys

I en systematisk känslighetsanalys, presenterad i Wikby et al. (2023), studerades känsligheten på tre parametrar, överkonsolideringsgraden (OCR), den vertikala och den horisontella hydrauliska konduktiviteten (k_v och k_h), för 10kPa portryckssänkning och 1 års konsolidering på tvärsektion BB.. Spannet av beräknad sättning för alla parameterkombinationer visas i grått i figur 10. Sättningsresultaten för när en parameter förändras (lokal ansats för känslighetsanalysen) visas som svart linje. Ur resultaten kan man tydligt se att OCR har störst inflytande på sättningarna, följt av vertikal hydraulisk konduktivitet.

Den horisontella hydrauliska konduktiviteten visar sig dock ha ytterst lite inflytande på sättningarna i figur 10. Detta resultat kan förklaras med tre fenomen: Den genomsnittliga dräneringsvägen är längre i horisontell riktning än i vertikal. Den horisontella hydrauliska konduktiviteten antas vara

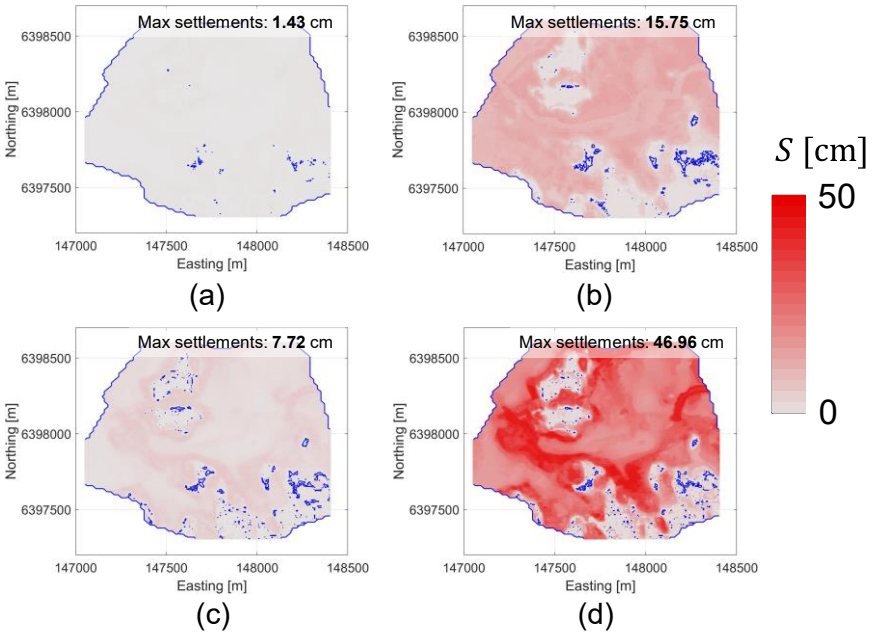
maximalt två gånger större ($r_k = 2$) än den vertikala (rimligt för homogent marin lera). Om tunna dränerande skikt förekommer i leran (t.ex. silt eller sandlinser) kan effekten av den horisontella hydrauliska konduktiviteten vara betydligt större. Ansättningen av den uniforma grundvattensänkningen kan underskatta känsligheten för den horisontella komponenten hos sättningar i lokaler nära tunnelläckageläge och infiltrationsanläggning, där avsänkningstratten är mycket brant.



Figur 10. Känslighetsanalysen på profil BB under 10 kPa portryckssänkning och efter 1 års konsolidering. SA range är det totala osäkerhetsintervallet, k_v är den vertikala hydrauliska konduktiviteten och r_k är den hydrauliska anisotropin. Från Wikby et al. (2023).

4.3 Metamodell

Sättningsresultatet av metamodellen visas i figur 11. Precis som för Plaxis-modellen visar dessa resultat på att de största sättningarna sker där leran är tunn i tidig konsolidering (Figur 8c-d) medan de jämnar ut sig över tiden (Figur 8b).

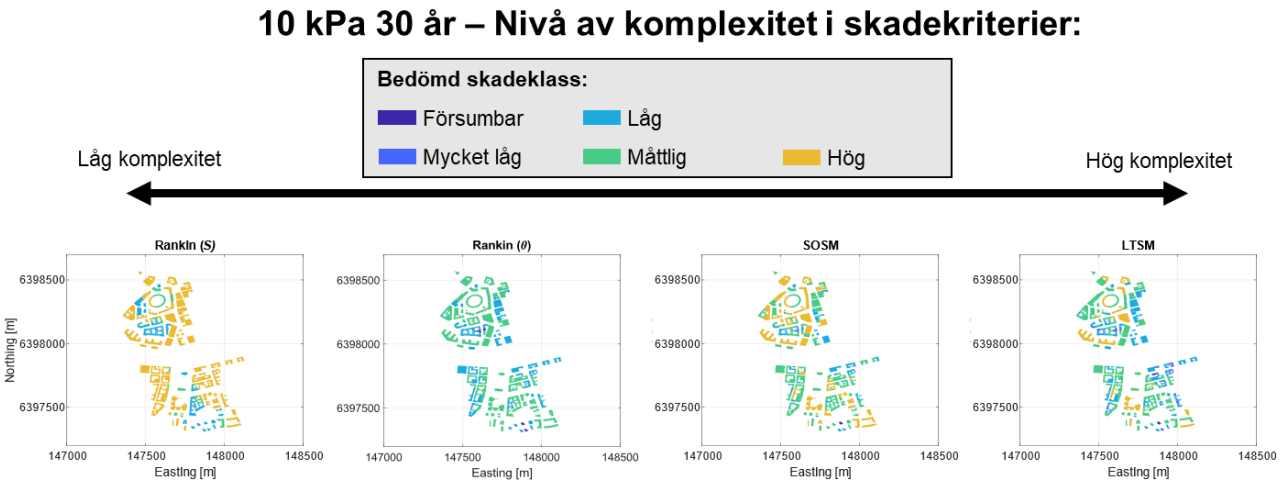


Figur 11. Sättningsresultat från metamodellen över hela modellområdet. Blått visar områden med negligerbara sättningar och visar ungefär var berget går i dagen. Resultat från fall av portryckssänkning och konsolideringstid: a) 10kPa (=1m) och 1 år, b) 10 kPa och 30 år, c) 40 kPa (=4m) och 1 år, d) 40 kPa och 30 år. Modifierat från Haaf et al. (in preparation).

4.3 Byggnadsskador

Resultaten från byggnadsskademodellen beskrivs i detalj i Wikby et al. (2024). Figur 12 visar resulterande byggnadsskador för skadekriterierna Rankin, SOSM och LTSM för konsolideringsfallet 40 kPa, 1 år (4 meters sänkning under 1 års tid). Resultat av korrelation mellan två skadeparametrar (vilket gäller alla konsolideringsfall) visar att totalsättningars (S) korrelation med andra skadeparametrar är betydligt lägre än för andra parameterkorrelationer. Detta tros bero på en stor utveckling av uniforma sättningar (i motsats till differentialsättningar) som inte borde ha någon större påverkan på byggnaden. Därför överskattas troligen den resulterade skadan från denna parameter (Figur 12). De andra parametrarna är dock snarlika i sin formulering och rekommenderas därför att användas. Detta förutsätter att gränserna mellan två skadenivåer kalibreras för en specifik byggnadstypologi. Exempelvis kan detta göras genom att undersöka samband av empiriska data mellan mängden utvecklad skada och de uppmätta differentialsättningarna över en viss period (Se exempelvis Zhang and Ng (2005) och Peduto et al. (2019)). För svenska byggnader har dock ingen sådan undersökning gjorts vad författaren vet. I det specifika fallet för figur 12 är det exempelvis stor skillnad på skadenivåerna mellan Rankin (θ) och SOSM. Eftersom skadekriterierna baseras på tegelbyggnader, som är betydligt känsligare än exempelvis en betongbyggnad, överskattas skadenivån för sådana byggnadstyper.

En begränsning med denna version av byggnadsskademodell är att grundläggningens och överbyggnadens styvhet inte beaktas, vilket troligtvis överskattar sättningen och i sin tur skadenivån. En annan begränsning är att öppningar (exempelvis dörrar och fönster) och tidigare skador inte beaktas vilket kan resultera i en underskattning av skadorna.



Figur 12. Beräknad skadeklass för olika skadekriterier för fall 10kPa portryckssänkning och 30 års konsolidering. Från Wikby et al. (2024).

5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Generellt visar denna rapport att denna typ av metodik kan användas i stor skala för att bestämma var, när och hur stora sättningar utvecklas och vilken påverkan dessa sättningar får på omfattningen av byggnadsskador. Bland de viktigaste resultaten från detta projekt är att geometrin (stratigrafi och resulterad byggnadssättningsprofil), överkonsolideringen, samt att valet av skadekriterium är viktiga faktorer för att korrekt bestämma storleken på sättningsskadenivåer. Byggnadsskademodellen visar dessutom på att totalsättningar inte är ett lika tillförlitligt mått på skada som andra parametrar (exempelvis vinkeländring) som baseras på differentialsättningar. Utöver det har vi vidare utforskat bälgslangens potential att kalibrera modellen på större djup.

För mer tillförlitliga resultat rekommenderas att fler bälgslangar installeras då de har potentiellt stark mätnoggrannhet (+/-1mm) och kan användas i svackor där lermäktigheten är stor (>10m) och för att få en bättre bild av parameterosäkerheten på dessa djup. På djup större än 30m bör provtagning samt ödometerförsök på dessa utföras med stor försiktighet då det finns risk för att provkropparna sväller för fort och för mycket och på så sätt blir störda. Dessutom rekommenderas även att prover tas för ödometerförsök på flera lokaler i modellområdet.

Modellresultaten bör uppdateras för att ta hänsyn till de utformade åtgärder som man vill undersöka, exempelvis realistiska grundvattenförändringar pga. tunnel/schakt och grundvatteninfiltration. Byggnadsskademodellen bör utvecklas för att kunna beräkna skadeparametrar på sättningsprofiler i fler riktningar än två, och ta hänsyn till horisontella rörelser, byggnaders och grundläggningars styvhet, samt existerande skador.

Studier i byggnaders skadeutveckling i förhållande till sättningar saknas för svenska byggnader och svensk geologi. Sådana studier skulle förbättra kopplingen mellan de teoretiska modeller som här presenterats och verkligheten. En validering av modellernas resultat vore lämplig, men det är svårt att hitta platser där det är praktiskt genomförbart pga. juridiska begränsningar, det krävs planerad grundvattensänkning, förväntade sättningar och byggnader som kan skadas, vilket är just sådant som brukar undvikas i projekten med omfattande vattenverksamhet. Tillförlitlig kalibrering kan endast ske mot sättningsskador av högre grad där stora sättningar uppkommit då små sprickor (estetiska skador) kan ha uppkommit från andra källor, exempelvis interna belastningar, temperaturförändringar, korrosion, dålig konstruktion/skötsel eller vibrationer pga. sprängningar eller jordbävningar (BRE 1995).

Det är viktigt att komma ihåg att denna analys har utförts i stadsskala där syftet var att modellera översiktliga skadeprognoser. Därför har vissa förenklingar gjorts. För det första har inte spatialt varierande hydrogeomekaniska förhållanden beaktats. Sandlinser i lerlagren kan förekomma lokalt (mer i exempelvis Korsvägen än i Haga) som har hittills okänd påverkan på sättningar under antagna förhållanden. Dess påverkan på konsolideringsprocessen till undre grundvattenmagasin bör beaktas i högre grad. För det andra är modellen mycket känslig för överkonsolideringsgraden, vilken varierar lokalt pga. tidigare belastningshistorik. Att belastningshistoriken är lokal beror på att den är påverkad av byggnader med dess fundament, utgrävning av kanal, påfyllning av fyllnadsmaterial samt lokala grundvattennivåförändringar. Samt, för det tredje har inte byggnaders konstruktions- och grundläggningstyp, byggnadsmaterial samt tidigare skador ej beaktats. Att beakta lokalbaserad överkonsolideringsgrad med variation i djupet, detaljerad byggnads- och stratigrafiinformation i en

översiktlig modellmetodik är dock beräkningsmässigt mycket tungt. Sådant skulle kunna beaktas i en nerskalad modellmetodik för individuella byggnader i 3D kalibrerade mot närliggande hydrogeomekaniska undersökningar. Förslagsvis görs det endast på byggnader som resulterat i allvarliga skadeklasser där osäkerheten i den prognostiserade skadekostnaden är stor. Den typen av beslutsträd har exempelvis föreslagits i (Mair et al. 1996). I sådana analyser bör även grundläggningen, byggnadstypen, byggnadsmaterial samt tidigare skador beaktas. Även sådana numeriska analyser i 3D kan användas vid validering av byggnadsskademodellen i brist på fältmätningar.

Även om den föreslagna modellmetodiken beaktar hela processen från inläckage till byggnadsskada på en mycket avancerad nivå så bör metodiken utvecklas till att även beakta osäkerheter i större grad. Det kan exempelvis göras genom probabilistisk (Sundell et al. 2019, Merisalu et al. 2023) eller semi-probabilistisk (Wikby et al. 2023) modellering.

6 REFERENSER

BRE. 1995. Assessment of damage in low-rise buildings. Watford.

Burland, J. B., B. B. Broms, and V. F. De Mello. 1977. Behaviour of foundations and structures. Pages 495-546 *in* Proceedings of the 9th international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo.

Burland, J. B., R. J. Mair, and J. R. Standing. 2004. Ground performance and building response due to tunnelling. Pages 291-342 Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference.

Burland, J. B., and C. Wroth. 1974. Settlement of buildings and associated damage. Pages 611-654 *in* Proceedings of the British geotechnical society's conference on settlement of structures, Cambridge.

Gras, J.-P., N. Sivasithamparam, M. Karstunen, and J. Dijkstra. 2017. Strategy for consistent model parameter calibration for soft soils using multi-objective optimisation. Computers and Geotechnics **90**:164-175.

Gras, J.-P., N. Sivasithamparam, M. Karstunen, and J. Dijkstra. 2018. Permissible range of model parameters for natural fine-grained materials. Acta Geotechnica **13**:387-398.

Haaf, E., P. Wikby, A. Abed, J. Sundell, E. McGivney, L. Rosén, and M. Karstunen. in preparation. A metamodel for estimating time-dependent groundwater-induced subsidence at city scale. Manuskript inskickat till tidsskrift.

Larsson, R., G. Sällfors, P.-E. Bengtsson, C. Alén, U. Berghdahl, and L. Eriksson. 2007. Skjuvhållfasthet-utvärdering i kohesionsjord. Statens geotekniska institut.

Mair, R., R. Taylor, and J. Burland. 1996. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. Pages 713-718 *in* Geotechnical aspects of underground construction in soft ground.

Merisalu, J., J. Sundell, and L. Rosén. 2023. Probabilistic cost-benefit analysis for mitigating hydrogeological risks in underground construction. Tunnelling And Underground Space Technology **131**:104815.

Peduto, D., M. Korff, G. Nicodemo, A. Marchese, and S. Ferlisi. 2019. Empirical fragility curves for settlement-affected buildings: Analysis of different intensity parameters for seven hundred masonry buildings in The Netherlands. Soils And Foundations **59**:380-397.

Rankin, W. J. 1988. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications **5**:79-92.

Sivasithamparam, N., M. Karstunen, and P. Bonnier. 2015. Modelling creep behaviour of anisotropic soft soils. Computers and Geotechnics **69**:46-57.

Son, M., and E. J. Cording. 2005. Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering **131**:162-177.

Sundell, J. 2018. Risk Assessment of Groundwater Drawdown in Subsidence Sensitive Areas. Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Sundell, J., E. Haaf, J. Tornborg, and L. Rosén. 2019. Comprehensive risk assessment of groundwater drawdown induced subsidence. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment **33**:427-449.

Sundell, J., L. Rosén, T. Norberg, and E. Haaf. 2016. A probabilistic approach to soil layer and bedrock-level modeling for risk assessment of groundwater drawdown induced land subsidence. Engineering Geology **203**:126-139.

Tavenas, F., P. Jean, P. Leblond, and S. Leroueil. 1983. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal **20**:645-660.

Tornborg, J., M. Karlsson, A. Kullingsjö, and M. Karstunen. 2021. Modelling the construction and long-term response of Göta Tunnel. Computers and Geotechnics **134**:104027.

Trafikverket. 2014. PM F - 001 PM Inventering tidigare utförda hydrogeologiska undersökningar.
Wikby, P., A. Abed, M. Karlsson, J. Sundell, and M. Karstunen. 2023. The influence of parameter variability on subsidence.*in* 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, London.
Wikby, P., E. Haaf, A. Abed, L. Rosén, J. Sundell, and M. Karstunen. 2024. A grid-based methodology for the assessment of time-dependent building damage at large scale. Tunnelling And Underground Space Technology **149**:105788.
Win, B. M., A. Arulrajah, and V. Choa. 1998. The hydraulic conductivity of Singapore Marine Clay at Changi. Quarterly Journal of Engineering Geology **31**:291-299.
Zhang, L., and A. Ng. 2005. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations. Geotechnique **55**:151-161.

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

CHALMERS