

RISKBEDÖMNING VID GRUNDEVATTENSÄNKNING I SÄTTNINGSKÄNSLIGA OMRÅDEN – FALLSTUDIE VARBERGSTUNNELN

Jonas Sundell

Ezra Haaf

Lars Rosén

Johannes Tornborg

RISKBEDÖMNING VID GRUNDTVATTENSÄNKNING I SÄTTNINGSKÄNSLIGA OMRÅDEN – FALLSTUDIE VARBERGSTUNNELN

**Risk estimation of groundwater drawdown in
subsidence sensitive areas – the Varberg
tunnel case study**

Jonas Sundell, Chalmers Tekniska Högskola

Ezra Haaf, Chalmers Tekniska Högskola

Lars Rosén, Chalmers Tekniska Högskola

Johannes Tornborg Chalmers Tekniska Högskola

Förord

Undermarksbyggande innebär ofta inläckage av grundvatten till anläggningen med grundvattensänkningar i omgivningen som följd. För att undvika skador kan säkerhetshöjande åtgärder genomföras. Förhållandena i jord och berg är heterogena och anisotropa och undersökningar kan inte ge helt fullständig information rörande området som påverkas av en grundvattensänkning. Därför måste beslut om säkerhetshöjande åtgärder tas under osäkerhet. För att hantera dessa osäkerheter på ett relevant sätt i underlag för beslut är risk-baserade metoder lämpliga.

I denna rapport presenteras en metod för att modellera hela kedjan från inläckage av grundvatten till skadekostnader och åtgärder i en riskbedömning. Rapporten är uppdelad i fyra delar (var och en presenterad som en delrapport) och metoden är tillämpad på en fallstudie för Varbergstunneln.

Den första delen behandlar en probabilistisk modell för jordlager och bergnivåer. I den andra delen presenteras en metod för grundvattenmodellering som beaktar möjliga utfall av ett antal åtgärdsalternativ för design av tätning och dränering kring tunneln. I den tredje delen kombineras de probabilistiska modellerna för jordlager, bergnivå, grundvattennivå och grundvattensänkning med sannolikhetsfördelningar av lerans kompressionsegenskaper för att probabilistiskt simulera marksättningens storlek. I den fjärde och sista delen värderas de ekonomiska riskerna av en marksättning till följd av grundvattensänkning.

Utöver denna rapport har forskningsprojektet presenterats i en doktorsavhandling, en licentiatavhandling, vetenskapliga artiklar samt vid flera internationella och nationella konferenser. Finansiering till detta projekt har erhållits från Forskningsrådet Formas (kontrakt 2012-1933), BeFo (kontrakt 333), COWI-fonden och Trafikverket (kontrakt 2017/61697).

Till forskningsprojektet har en referensgrupp bestående av Per Tengborg, Niklas Blomquist, Bengt Åhlén, Staffan Swedenborg, Davis Wladis, Ulf Sundquist, Bo Olofsson och Patrik Alm varit knuten.

Arbetet med fallstudien för Varbergstunneln har genomförts av Jonas Sundell, Ezra Haaf, Johannes Tornborg och Lars Rosén. Till fallstudien med Varbergstunneln har en grupp bestående av bland andra Hans Hargelius, Christian Butrón, Bengt Åhlén, Carina Hultén och Jesper Mårtensson, samtliga på Trafikverket, konsulterats under arbetets gång.

Stockholm

Patrik Vidstrand

Sammanfattning

I denna rapport presenteras en metod för riskbedömning av grundvattensänkning i sättningskänsliga områden vid planering av undermarksbyggnation. Metoden omfattar hela händelsekedjan från inläckage till konstruktionen, grundvattensänkning, reducering av portryck, marksättningar, skador och kostnader till följd av dessa skador. En grundvattensänkning och dess resulterande marksättning kan uppkomma på stora avstånd från platserna för inläckage till undermarksanläggningen. Över denna stora skala som detta avstånd medför är de geologiska förhållandena ofta heterogena och kan inte beskrivas i detalj. För att under dessa förhållanden kunna beskriva hela händelsekedjan behövs metoder som beaktar osäkerheter i samtliga kedjans delar. I denna rapport kopplar vi fyra probabilistiska metoder till en modell för ekonomisk riskbedömning: en geostatistisk bergnivå- och jordlagerföljdsmodell, en invers kalibrerad grundvattenmodell, en elasto-plastisk marksättningsmodell och en modell som beskriver sättningssskador och kostnader för enskilda byggnader. Data till modellen ges av mätningar av grundvattennivåer, hydrogeologiska undersökningar i jord och berg, borrhålsdata med tolkade jordlagerföljder och bergnivåer, jordprovtagning och en inventering av byggnader och dess grundläggning. Med den kopplade modellen uppskattas den ekonomiska risken för ett referensalternativ (vanligen inga åtgärder) och ett antal åtgärdsalternativ som en funktion av sannolikheten för skada och dess ekonomiska konsekvens (skadekostnad). Det bästa åtgärdsalternativet identifieras med hjälp av kostnads-nyttoanalys som det alternativ som har högst netto nytta, dvs förväntad riskminskning (nytta) minus åtgärds kostnad. Resultaten presenteras på kartor med spatiella riskestimater för varje alternativ där områden med hög och låg risk kan särskiljas. Effektiviteten och användbarheten av denna modelleringsansats som ett verktyg för riskkommunikation, beslutsstöd för prioritering av riskreducerande åtgärder samt för att identifiera behovet av ytterligare undersökningar och övervakning demonstreras i en fallstudie för en del av den planerade järnvägstunneln Varbergstunneln.

Nyckelord: Grundvattensänkning, marksättning, infrastrukturplanering, riskbedömning, kostnads-nyttoanalys.

Summary

Herein a method for risk assessment of groundwater drawdown induced land subsidence when planning for sub-surface infrastructure is presented. The method is comprehensive, since all components of the cause-effect chain are included: inflow to the construction, lowering of groundwater heads and pore pressure in the compressible deposits, subsidence, damage of the constructions founded on these deposits, and finally, the economic consequence of the damages. Since groundwater drawdown and related subsidence can occur at large distances from the points of inflow, the large spatial extent often implies heterogeneous geological conditions that cannot be described in complete detail. This calls for estimation of uncertainties in all components of the cause-effect chain with probabilistic methods. In this report, we couple four probabilistic methods into a model for economic risk quantification: a geostatistical bedrock- and soil-stratification model, an inverse calibrated groundwater model, an elasto-plastic subsidence model, and a model describing the resulting damages and costs on individual buildings and constructions. Groundwater head measurements, hydraulic tests, statistical analyses of stratification and soil properties and an inventory of buildings are inputs to the models. In the coupled method, different design alternatives for risk reduction measures are evaluated. Integration of probabilities and damage costs result in an economic risk estimate for each alternative. The best alternative is identified as the alternative with the highest expected net benefit, i.e. expected risk reduction (benefit) minus expected cost for alternative (investment and maintenance). The results include spatial probabilistic risk estimates for each alternative where areas with significant risk are distinguished from low-risk areas. The efficiency and usefulness of this modelling approach as a tool for communication to stakeholders, decision support for prioritization of risk reducing measures, and identification of the need for further investigations and monitoring is demonstrated with a case study of a planned railway tunnel in Varberg, Sweden.

Keywords: Groundwater drawdown, subsidence, infrastructure planning, risk assessment, cost-benefit analysis

INNEHÅLL

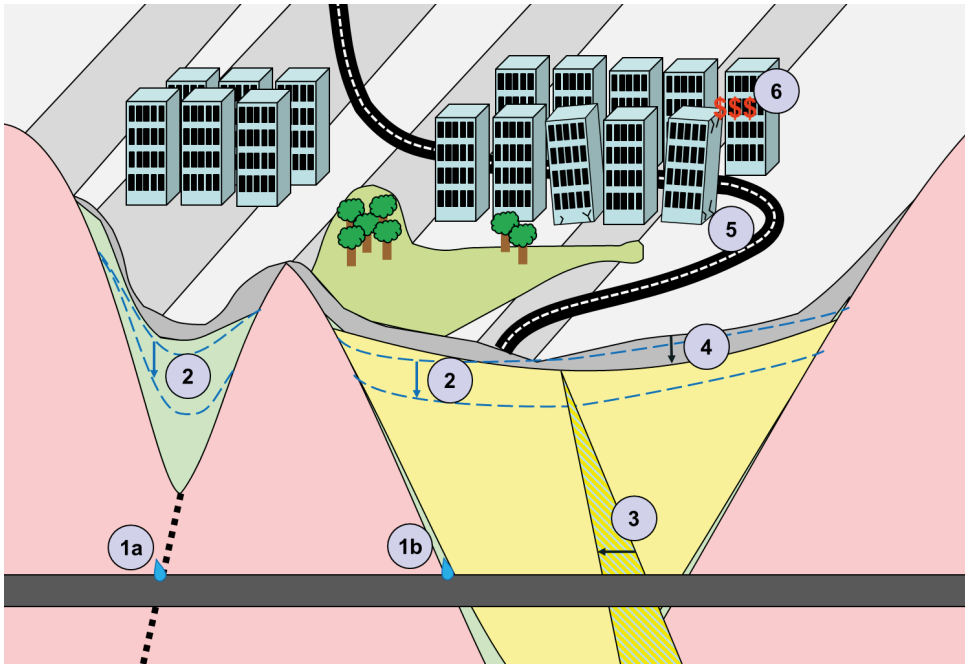
1	Bakgrund.....	1
2	Referenser.....	5
	Del 1 Metodbeskrivning av probabilistisk modell för berg-, jordlager- och grundvattennivåer	9
	Del 2 Invers probabilistisk modellering av förändrade grundvattennivåer	47
	Del 3 Metodbeskrivning av probabilistisk marksättningsmodell vid grundvattensänkning.....	97
	Del 4 Metodbeskrivning av riskberäkning och riskvärdering av marksättning vid grundvattensänkning.....	141

I. BAKGRUND

Till skillnad från byggnation över mark med väl kända material innebär förutsättningarna för undermarksbyggnation ofta osäkra och variabla förhållanden (Lundman, 2011) eftersom jordtäcknet och berggrunden är formade och påverkade av komplexa geologiska och antropogena processer. Dessa förhållanden kan resultera i olika typer av risker där en riskhändelse är skadliga marksättningar till följd av inläckage av grundvatten till undermarksanläggningen. Eftersom en grundvattensänkning kan förekomma över ett större område (flera kvadratkilometer), se t.ex. Burbey (2002), Huang et al. (2012), kan ett stort antal byggnader skadas. Exempel på skador från marksättningar orsakade av grundvattensänkningar finns på flera platser i världen, t.ex. i Shanghai (Xue et al., 2005), Mexico City (Ortega-Guerrero et al., 1999), Bangkok (Phien-wej et al., 2006), Las Vegas (Burbey, 2002), Los Angeles (Bryan et al., 2018) men också på närmare håll, t.ex. i Stockholm, Göteborg och Oslo (Karlsrud, 1999; Olofsson, 1994).

Händelsekedjan från inläckage av grundvatten till skador och kostnader innebär en interaktion mellan flera olika processer. Kedjan (Figur 1) initieras av ett inläckage av grundvatten till anläggningen i jord eller i berg (1). Processen fortsätter med reduktion av grundvattennivåer i berörda akvifärer (2), reduktion av portryck (3) i lera eller annat kompressibelt material och efterföljande konsolideringssättning (4). Byggnadernas respons på sättningen styrs av dess grundläggning och konstruktion (5). I kedjans sista del uppkommer ekonomiska konsekvenser i form av skadekostnader (6) (Sundell, 2016; Sundell et al., 2017).

Vid planering av framtida undermarksbyggnationer finns olika alternativ för riskreducerande åtgärder för att undvika sättningar och skador såsom tätning för att undvika inläckage och infiltration för att upprätthålla grundvattennivåer. Dessa alternativ har olika för- och nackdelar i form av robusthet, kostnad och bedömd riskminskning. Eftersom systemet kännetecknas av jord- och bergförhållanden med betydande heterogenitet kan det inte undersökas fullt ut i alla avseenden. Därför är det nödvändigt att uppskatta osäkerheter i händelsekedjans samtliga delar vid bedömningen av de olika alternativen. Att välja det bästa av dessa alternativ givet ett kriterium skapar ett beslutsproblem. Ett kriterium kan t.ex. vara en tolerabel nivå för skadeomfattning (tolerabilitetskriterium) eller att välja det alternativ som har störst netto nytta i förhållandet mellan dess nyttor och kostnader (ett lönsamhetskriterium). I denna rapport används kostnads-nyttoanalys för att identifiera det åtgärdsalternativ som har högst netto nytta genom att väga förväntad riskminskning (som en funktion av sannolikhet för skada och dess ekonomiska konsekvens) mot kostnader för att genomföra och underhålla åtgärden.



Figur 1 Händelsekedjan för skador från marksättningar till följd av grundvattensänkningar. Den rosa ytan visar berggrunden, grönt: grovkornigt material, gult: lera, och grått grovkornigt fyllnadsmaterial. Den streckade linjen vid 1a illustrerar en sprickzon (Sundell, 2016; Sundell et al., 2017).

I kedjans olika delar varierar vilken information som typiskt finns tillgänglig vilket innebär att olika metoder för att bedöma osäkerheter måste kombineras. I urbana områden finns ofta ett stort antal borrh- och sonderingsprotokoll från undersökningar i jord och berg med tolkningar av stratigrafi (de Rienzo et al., 2008; Marache et al., 2009; Velasco et al., 2013). Denna geologiska information är nödvändig för att skapa en geometrisk modell av geologin i ett område vilket i sin tur är nödvändig för att förstå grundvattenflödes- och marksättningsprocessen i olika geologiska material. Med hög täthet mellan borrhålen kan den geostatistiska interpolationsmetoden Kriging (Matheron, 1963) användas för att bedöma spatiala osäkerheter i stratigrafi, se t.ex. Asa et al. (2012), Bourguine et al. (2006) eller Thierry et al. (2009). Undersökningar som beskriver de hydrogeologiska egenskaperna är ofta mer glest utspridda vilket kan innebära att Kriging-metoden inte är tillämpbar och att parameteregenskaperna såsom hydraulisk konduktivitet är okända på flera platser och i flera material. Däremot finns ofta grundvattennivåobservationer från flertalet platser vilket möjliggör invers kalibrering av parametervärden där data saknas.

På grund av rådande osäkerheter finns flera oberoende (t.ex. hydraulisk konduktivitet på olika platser i olika material) än beroende (faktiska observationer av t.ex. grundvattennivåer) parametrar i det hydrogeologiska systemet. Detta innebär att flera

olika modeller och parametriseringar kan vara likvärdigt acceptabla till samma observationer. En metod för att bedöma grundvattnets flödesförhållanden under dessa förutsättningar är invers-kalibrerade stokastiska simuleringar där flera möjliga parameteruppsättningar som stämmer överens med tillgängliga observationer beräknas (Burrows & Doherty, 2015; Carrera et al., 2005; Doherty, 2003; Li & Zhang, 2018; Siade et al., 2017; Tonkin & Doherty, 2009). Även undersökningar som beskriver kompressionsegenskaper är ofta glest förekommande. Osäkerheter i kompressionsegenskaper kan utvärderas genom att beskriva trender i data med regressionsmetoder och uppskatta täthetsfunktioner för sannolikhet (Sundell et al., 2017). Information om byggnaders grundläggning kan ofta erhållas från stadsbyggnadskontorets arkiv. En byggnads känslighet för en marksättning av en viss storlek kan sedan klassas från scheman som beskriver samband mellan sättningens storlek och skada i olika kategorier se t.ex. Skempton and Macdonald (1956), Bjerrum (1963), Rankin (1988) och Son and Cording (2005). I ett sista steg kan skadekostnader värderas från historiska uppgifter om skadekostnader i respektive skadekategori.

Syftet med denna rapport är att presentera en metod för riskbedömning med kostnadsnyttoanalys av riskreducerande åtgärder som beaktar hela händelsekedjan, från inläckage av grundvatten till skadekostnader. Denna metod beaktar osäkerheter i kedjans alla delar, är anpassad för den stora skalan för grundvattensänkningar och beaktar tillgänglig information i kedjans olika delar. Även om metoden beaktar hela kedjan är bedömningen av osäkerheter begränsade till parameterosäkerheter vilket innebär att t.ex. modellosäkerheter inte beaktas, se t.ex. Refsgaard et al. (2007).

Metoden exemplifieras i rapportens följande fyra delar med en fallstudie för den planerade järnvägstunneln Varbergstunneln. Del 1 redovisar en metod för att modellera jordlager och bergnivåer probabilistiskt. Del 2 redovisar en probabilistisk metod för grundvattenmodellering som beaktar möjliga utfall för ett antal åtgärdsalternativ för design av tätning och dränering kring tunneln. Del 3 kombinerar de probabilistiska modellerna för jordlager, bergnivå, grundvattennivå och grundvattensänkning med sannolikhetsfördelningar av lerans kompressionsegenskaper för att simulera marksättningens storlek probabilistiskt. I den fjärde delen beräknas de ekonomiska konsekvenserna av en marksättning till följd av grundvattensänkning tillsammans med den ekonomiska lönsamheten (nettonyttan) av olika åtgärdsalternativ relativt ett referensalternativ.

2. REFERENSER

- Asa, E., Saafi, M., Membah, J., & Billa, A. (2012). Comparison of linear and nonlinear kriging methods for characterization and interpolation of soil data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(1), 11-18.
- Bjerrum, L. (1963). *Allowable settlement of structures*. Paper presented at the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden.
- Bourgine, B., Dominique, S., Marache, A., & Thierry, P. (2006, 6-10/09/2006). *Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment; the case of Bordeaux*. Paper presented at the Engineering Geology for Tomorrow's Cities,, Nottingham, UK.
- Bryan, R., Mark, S., Daniel, P., Piyush, A., & Romain, J. (2018). Quantifying Ground Deformation in the Los Angeles and Santa Ana Coastal Basins Due to Groundwater Withdrawal. *Water Resources Research*, 54(5), 3557-3582. doi:doi:10.1029/2017WR021978
- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525-538. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- Burrows, W., & Doherty, J. (2015). Efficient Calibration/Uncertainty Analysis Using Paired Complex/Surrogate Models. *Groundwater*, 53(4), 531-541. doi:10.1111/gwat.12257
- Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J., & Slooten, L. J. (2005). Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 206-222. doi:10.1007/s10040-004-0404-7
- de Rienzo, F., Oreste, P., & Pelizza, S. (2008). Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology*, 96(3-4), 187-204. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.002>
- Doherty, J. (2003). Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. *Ground Water*, 41(2), 170-177. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02580.x
- Huang, B., Shu, L., & Yang, Y. S. (2012). Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling. *Water Resources Management*, 26(14), 4225-4239. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y>
- Karlsruh, K. (1999, 7-10 June 1999). *General aspects of transportation infrastructure*. Paper presented at the Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance : Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Netherlands.
- Li, L., & Zhang, M. (2018). Inverse modeling of interbed parameters and transmissivity using land subsidence and drawdown data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(4), 921-930. doi:10.1007/s00477-017-1396-x
- Lundman, P. (2011). Cost management for underground infrastructure projects: A case study on cost increase and its causes. *Luleå University of Technology, Luleå*.

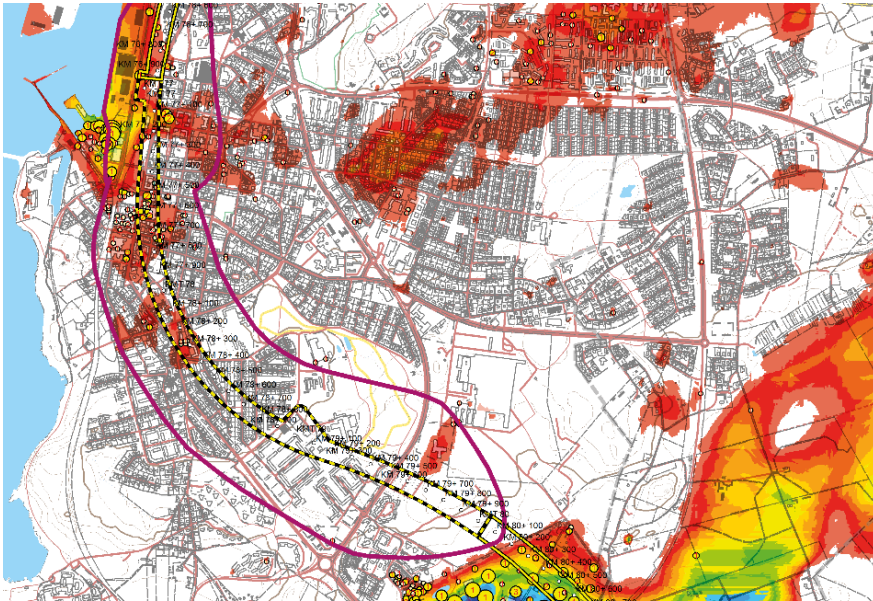
- Marache, A., Breyse, D., Piette, C., & Thierry, P. (2009). Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: The Pessac case (France). *Engineering Geology*, 107(3–4), 67-76.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.04.003>
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58(8), 1246-1266.
- Olofsson, B. (1994). Flow Of Groundwater From Soil To Crystalline Rock. *Applied Hydrogeology*, 2(3), 71-83. doi:10.1007/s100400050052
- Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D. L., & Cherry, J. A. (1999). Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35(11), 3327-3341. doi:10.1029/1999WR900148
- Phien-wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4), 187-201.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>
- Rankin, W. J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 5(1), 79-92. doi:10.1144/gsl.eng.1988.005.01.06
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22(11), 1543-1556.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004>
- Siade, A. J., Hall, J., & Karelse, R. N. (2017). A Practical, Robust Methodology for Acquiring New Observation Data Using Computationally Expensive Groundwater Models. *Water Resources Research*, 53(11), 9860-9882.
doi:10.1002/2017WR020814
- Skempton, A. W., & Macdonald, D. H. (1956). THE ALLOWABLE SETTLEMENTS OF BUILDINGS. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768. doi:10.1680/ipeds.1956.12202
- Son, M., & Cording, E. (2005). Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 162-177. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(162)
- Sundell, J. (2016). *Risk Estimation of Groundwater Drawdown in Subsidence Sensitive Areas*. (Licentiate of Engineering), Chalmers University of Technology, Gothenburg. Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/publication/236827-risk-estimation-of-groundwater-drawdown-in-subsidence-sensitive-areas>
- 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*, n/a-n/a.
doi:10.1111/risa.12890
- Thierry, P., Prunier-Leparmentier, A.-M., Lembezat, C., Vanoudheusden, E., & Vernoux, J.-F. (2009). 3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: The Paris example (France). *Engineering Geology*, 105(1–2), 51-64.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.010>

- Tonkin, M., & Doherty, J. (2009). Calibration-constrained Monte Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques. *Water Resources Research*, 45(12), n/a-n/a. doi:10.1029/2007WR006678
- Velasco, V., Gogu, R., Vázquez-Suñe, E., Garriga, A., Ramos, E., Riera, J., & Alcaraz, M. (2013). The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment. *Environmental Earth Sciences*, 68(8), 2145-2162. doi:10.1007/s12665-012-1898-2
- Xue, Y.-Q., Zhang, Y., Ye, S.-J., Wu, J.-C., & Li, Q.-F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 48(6), 713-720. doi:10.1007/s00254-005-0010-6

DEL I

METODBESKRIVNING AV PROBABILISTISK MODELL FÖR BERG-, JORDLAGER- OCH GRUNDTVATTENNIVÅER

VARBERGSTUNNELN



INNEHÅLL

1	Inledning	13
1.1	Syfte med modellen	13
1.2	Övergripande koncept och antaganden	14
1.3	Höjd och koordinatsystem	14
2	Teori	15
2.1	Variogram – lägesberoende mellan punkter med data	15
2.2	Kriging	16
3	Indata	19
3.1	Inventering Varbergs kommun arkiv	19
3.2	Sonderingsdatabas	20
3.3	Grundvattennivåer	24
3.4	Marknivåmodell	24
3.5	Utbredning av ytligt berg	24
4	Modell för bergytans nivå	25
4.1	Hantering av indata	25
4.2	Variogram för bergytans nivå	27
4.3	Interpolation med Kriging	28
4.4	Probabilistisk modell	30
5	Grundvattennivåmodell	33
6	Jordlagermodell	35
6.1	Hantering av indata	35
6.2	Variogram för jordlager	37
6.3	Interpolationssteg	39
6.4	Probabilistisk modell	41
6.5	Riskområde för marksättning	42
7	Referenser	45

I INLEDNING

Utredningsområdet för Varbergstunneln täcker in stora delar av Varberg. Inom området finns en stor datamängd geologisk information i form av till exempel geotekniska sonderingar, grundvattennivåobservationer och observationer av bergytans läge i dagen. Denna information är nödvändig för att beskriva områdets geologi och hydrogeologi. För att kunna hantera den stora mängden information på ett överblickbart, transparent och effektivt sätt, har en geologisk modell upprättats. Modellen beskriver i huvudsak nivåer för bergöverytan, lerans under- och överkant och grundvattnets trycknivå i det undre magasinet. Lera har varit nödvändigt att skilja från övriga jordlager då marksättningar främst kan uppkomma inom områden med lera.

En beskrivning av osäkerheter i modellen har genomförts för att hantera risker kopplade till den förväntade grundvattensänkningen och andra arbeten med Varbergstunneln. Exempel på en sådan risk är skador till följd av marksättningar. Osäkerheter förekommer dels i tolkningen av enskilda sonderingsresultat och dels inom områden där sonderingar saknas. För att beskriva och kvantifiera osäkerheter har den geostatistiska metoden Kriging använts.

Metoden har tidigare använts i Trafikverksprojekten Västlänken (Sundell, Haaf, et al., 2016), Förbifart Stockholm (Sundell et al., 2013) samt Svenska Kraftnäts projekt City Link Tunnel (Sundell, 2015). Metoden har tidigare dokumenterats i två vetenskapliga, referensgranskade tidskrifter, Sundell, Rosén, et al. (2016) och Sundell et al. (2017). För att anpassa de förhållanden som råder i för data som finns tillgänglig i Varberg har metoden justerats och utvecklats jämfört med tidigare studier.

1.1 Syfte med modellen

Det övergripande syftet med modellen är att beskriva förväntade värden och osäkerheter i bergnivå och mäktighet för enskilda jordlager inom ett utredningsområde som täcker stora delar av centrala Varberg. Utredningsområdet motsvarar i stort de ytvattenavrinningsområden som Varbergstunneln passerar. Det övergripande syftet rymmer också att interpolera förväntade värden för områdets grundvattennivå. Nedan listas ett urval av modellens detaljerade syften:

- Underlag för bedömning av grundvattenmagasinens utbredning.
- Bedömning av osäkerheter i bergtäckning utmed tunnellen.
- Modellgeometri för numeriska grundvattenmodeller.
- Underlag för bedömning av områdets känslighet för marksättningar orsakade av grundvattensänkning.
- Underlag för bedömning av påverkan på förorenade områden.

- Visualisering. Genom modellen kan samlad information från sonderingar, grundvattenmätningar mm presenteras på ett åskådligt sätt.

1.2 Övergripande koncept och antaganden

Modellen baseras på att geologin inom utredningsområdet generellt kan konceptualiseras till att bestå av denna lagerföljd:

- Postglacialt avlagrad friktionsjord, fyllnadsjord eller organiska avlagringar (överst)
- Lera
- Friktionsjord
- Bergyta (underst)

Inom områden där undersökningsdata indikerar avsaknad av lera förutsätts i modellen ett mycket tunt lerlager. Även om det förekommer lera som är växellagrad med andra jordarter inom vissa delar, förutsätts i modellen endast ett lager lera. Antagandet om att lera finns inom hela området bedöms vara rimligt då det förekommer sonderingar som visar på lera inom hela området.

För de fall då risk för skada ska bedömas är det av betydelse att studera osäkerheter i modellen. I ett område med många sonderingar är osäkerheterna generellt sett mindre jämfört med ett område med ett fåtal sonderingar. Osäkerheterna för de olika geolagren (bergnivå samt lerans läge och mäktighet i jordprofilen) har kvantifierats genom så kallade variogram, vilka beskriver hur samvariationen minskar med ökade avstånd mellan provtagningspunkter. Detta beskrivs mer ingående i kapitel 2.1.

Grundvattennivåmodellen beskriver grundvattnets trycknivå i det undre magasinet i jord och i de områden där det undre magasinet övergår till ett öppet magasin. Det undre magasinet utgörs av friktionsjorden under leran och det uppspruckna ytberget. Uppmätta grundvattennivåer har använts som indata. Interpolation har genomförts inom bedömda magasinsområden. Eftersom kriging inte kan hantera interpolation inom avgränsade områden har istället metoden "minimum curvature" använts. Denna interpolation ger en översiktlig bild av den rådande grundvattensituationen och kommer att uppdateras med den numeriska grundvattenmodellen i fallstudiens nästa del.

1.3 Höjd och koordinatsystem

Höjdsystem är RH2000. Koordinatsystem är SWEREF 99 TM. Samtliga data har konverterats om till dessa format. Interpolation har genomförts med en upplösning om 5 x 5 meter.

2 TEORI

För interpolation och bedömning av osäkerheter i jord- och bergnivåmodellen har interpolationsmetoden Kriging (Isaaks et al., 1989) använts. Krigingmetoden går ut på att ta hänsyn till den rumsliga variationen hos en variabel. Kriging är en geostatistisk metod för att interpolera fram värden av en viss variabel i icke provtagna punkter. Skillnaden mot andra interpolationsmetoder är att Kriging tar hänsyn till den verkliga autokorrelationen, det statistiska sambandet, som finns i insamlad data. Denna autokorrelation beskrivs av ett variogram vilket är ett diagram som visar variansen beroende av avstånd och riktning mellan provtagna punkter. Till punkterna som beskriver det experimentella variogrammet, anpassas en funktion, som matematiskt beskriver den rumsliga variationen hos aktuell variabel. Det modellerade variogrammet används i Kriginginterpolationen för att beskriva hur sonderingar på avstånd från en punkt som ska interpoleras ska viktas in i modellen. Eftersom autokorrelationen beaktas, kan förutom det interpolerade väntevärdet också ett mått på osäkerheten i interpolationen beskrivas.

2.1 Variogram – lägesberoende mellan punkter med data

Ett variogram beskriver hur snabbt samvariationen minskar med ökande avstånd från punkter som innehåller data. Den bakomliggande principen är att två punkter nära varandra är mer lika jämfört med två observationer på större avstånd. Eftersom de bakomliggande strukturerna som styr datavärdena ofta är riktningensberoende kan data variera mer i en riktning jämfört med andra. Exempel på en sådan struktur är områden där flertalet dalgångar ligger i nordostlig riktning. I och med detta varierar också bergnivåerna mindre i nordostlig riktning jämfört med övriga riktningar. Eftersom variogrammet är riktningensberoende kan storleken på den anisotropi (olika viktning av data i olika riktningar) som förekommer i datamängden kvantifieras.

Variogrammet är en tredimensionell funktion där två oberoende variabler, riktningen och avståndet, beskriver vektorn h , och i sin tur variogramvärdet $\gamma(h)$. Variogramvärdet är ett mått på hur snabbt medelskillnaden mellan datapunkter ökar beroende av avstånd och riktning. Efter ett visst avstånd uppnås en korrelationslängd (range). Information på större avstånd än detta kan inte skatta det verkliga värdet bättre än den övriga datamängden. I variogrammet för bergnivåmodellen uppnås detta avstånd på 300-500 m beroende av riktning, se Figur 7.

2.1.1 Experimentellt variogram

Det experimentella variogrammet beräknas från den datamängd som ska undersökas. I Varbergsprojektet har en stor mängd geoteknisk data samlats in för att beskriva områdets geologi. Dessa data har koordinater X , Y och datavärden v . Beroende av vad som ska mätas kan v exempelvis beskriva tolkad nivå för berg eller lerans mäktighet. Avståndet och riktningen mellan datapunkter, h , kan beskrivas av koordinaternas

lågesskillnad Δx och Δy . Den totala mängden datapunkter inom ett visst avstånd och riktning definieras av $N(Dx, Dy)$. För vart och ett av samtliga datapar (i och j) med avståndet h , beräknas kvadratsumman av skillnaden mellan dessa, $\sum (v_i - v_j)^2$. Det experimentella variogrammet kan då beskrivas som halva medelvärdet av den kvadrerade skillnaden mellan de parvisa datavärdena:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)|h_{ij}=h} (v_i - v_j)^2$$

2.1.2 Modellerat variogram

Till det experimentella variogrammet anpassas en matematisk funktion som beskriver det modellerade variogrammet. Detta är nödvändigt för kriginginterpolationen. Flera olika typer av funktioner kan användas, var för sig eller tillsammans. För de data som har modellerats i Varbergs-projektet har två typer av modeller visat sig vara lämpliga: *exponentiell-* och *sfäriskmodell*. Dessa kombineras med en *nugget effekt*.

En *nugget effekt* uppkommer när det förekommer en varians på små avstånd. Exempel på en sådan varians är provtagnings- eller tolkningsfel. Nugget effekten beskriver variogramvärdet för $h=0$.

$$\gamma(h) = C_0$$

Där C_0 är en konstant >0 .

Det *sfäriska variogrammet* definieras enligt följande, där C_3 är en konstant:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_3(1,5h - 0,5h^3) & h < 1 \\ C_3 & h \geq 1 \end{cases}$$

Det *exponentiella variogrammet* definieras enligt följande, där C_1 är en konstant:

$$\gamma(h) = C_1(1 - e^{-h})$$

För att anpassa det experimentella variogrammet till ett modellerat variogram har minsta kvadratmetoden använts. Med minsta kvadratmetoden väljs en formel för det modellerade variogrammet som minimerar kvadratsumman av felen mellan modellerat och experimentellt variogram.

2.2 Kriging

Genom det modellerade variogrammet kan vikten av datapunkter kring en punkt som ska interpoleras beräknas. Viktningen avgör vilket inflytande de olika datapunkterna har för den nya punkten som ska interpoleras. Den generella formeln för Kriging är formulerad som en viktad summa av den datamängd som används för interpolationen:

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i * V(x_i)$$

Där:

$V(x_i)$ är det uppmätta värdet på platsen med ordningen i .

w_i är viktningen av värdet på platsen med ordningen i .

x_0 är platsen som ska interpoleras.

n är antalet värden som används i interpolationen.

Viktningen, w_i , beror av variogrammodellen som har beskrivits ovan. Från interpolationen med Kriging beräknas också osäkerheten för det interpolerade värdet. Osäkerheten i interpolationen beskrivs av en beräknad standardavvikelse. Från kriginginterpolationen erhålls därmed ett väntevärde och en standardavvikelse för samtliga platser där interpolationen sker.

I en stokastisk modell simuleras samtliga möjliga utfall för en variabel. Den stokastiska simuleringen genererar en sannolikhetsfördelning ur vilken sannolikheten för ett visst värde kan utläsas. Detta kan jämföras med en deterministisk modell som endast använder ett värde för att beskriva en variabel.

Som nämndes i tidigare kapitel beräknas ett väntevärde och en standardavvikelse vid kriging. Med antagande om att variabeln som ska skattas kan beskrivas av en normalfördelning kan sannolikheten för ett värde av en viss storlek på en enskild plats beräknas. Geomodellen innehåller flera lager information: bergnivå och mäktighet för tre jordlager (fyllnad, lera, friktion). En grundläggande förutsättning för att genomföra en stokastisk simulering är att variablerna är oberoende av varandra. Mäktigheten för ett enskilt jordlager är beroende av den totala jordlagermäktigheten vilken i sin tur är beroende av bergnivån. För att kunna genomföra stokastiska simuleringar måste data transformeras så att beroenden inte förekommer. Istället för att modellera till exempel lermäktigheter har data för lermäktigheter räknats om till andelen lera av den totala jordmäktigheten. Hur transformationen har genomförts i detalj beskrivs i kapitel 6.

När geodata är transformerad så att beroenden saknas mellan olika variabler kan en stokastisk, så kallad Monte Carlo-simulering, genomföras. Denna simulering genomförs i programvaran R. Monte Carlo-simuleringen baseras på att värden slumpas från en definierad fördelning. Fördelningarna definieras av de väntevärden och standardavvikelser för geolager (bergnivå och jordlager) som beräknas genom Kriging-interpolationen.

För att beräkna en sannolikhetsfördelning för lermäktigheten måste även bergnivån beaktas. Först slumpas en bergnivå där jordmäktigheten beräknas från marknivån ner till berg. Sedan slumpas andelen lera, varefter lermäktigheten kan beräknas. Denna process upprepas tills dess att en stabil sannolikhetsfördelning för lermäktigheten erhålls. I modellen har 1000 simuleringar använts. Genom denna process kan en stokastisk

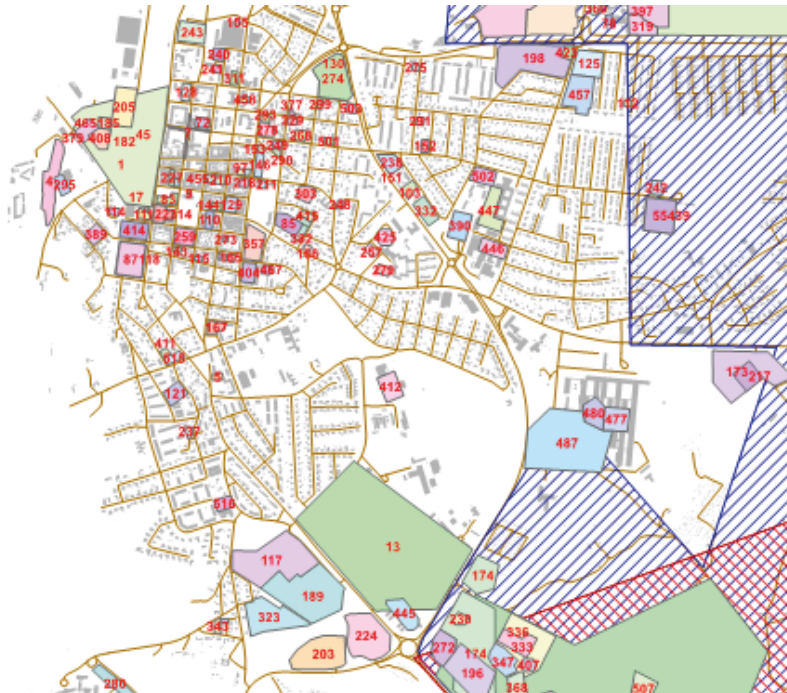
simulering genomförs samtidigt som beroenden mellan de olika geolagren beaktas. Detaljer kring den stokastiska simuleringen redovisas i kapitel 6.4.

3 INDATA

Jord- och bergnivåmodellen är uppbyggd av geotekniska sonderingar i en sonderingsdatabas, information om lägen för platser där bergytan går i dagen samt en laserscannad marknivåmodell. En sammanställning av de filer som använts vid modelleringen återfinns i Tabell 1.

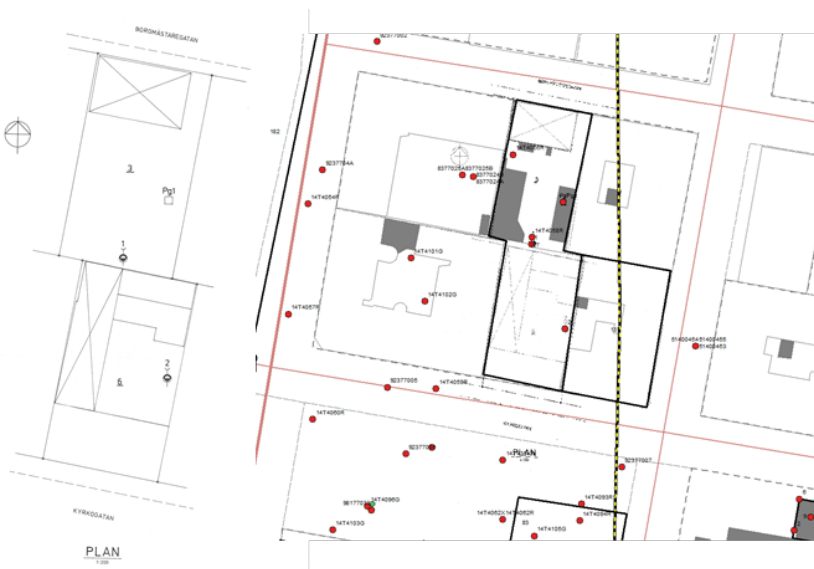
3.1 Inventering Varbergs kommun arkiv

Den 5-10:e Oktober 2017 genomfördes en inventering inom utredningsområdet på Varbergs kommuns arkiv. Kommunens arkiv är ordnat efter projektnummer, se Figur 1.



Figur 1 Utsnitt från projektnummer och utbredning för geotekniska sonderingar från Varbergs kommuns arkiv.

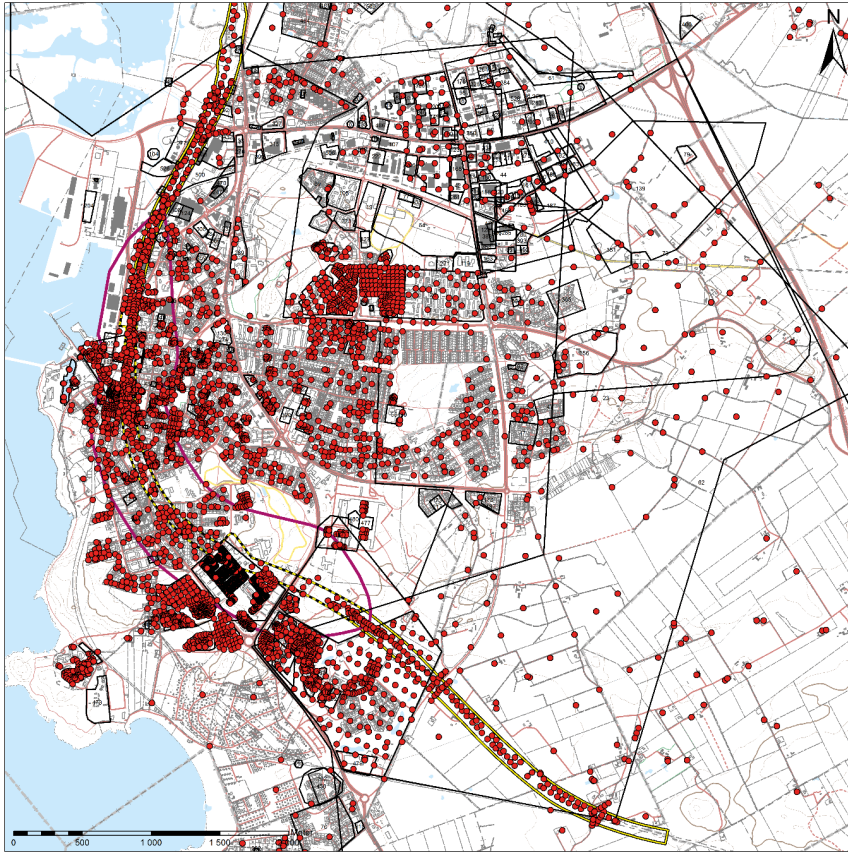
Från varje projekt har bildfiler med plankartor som markerar sonderingarnas placering sparats. Dessa kartor har koordinatsats genom referenspunkter, t.ex. byggnader eller gränser, se Figur 2.



Figur 2 Plan för projektnummer 227 (till vänster), koordinatsatt plan och georefererade sonderingspunkter (till höger).

3.2 Sonderingsdatabas

Totalt har information från 5500 sonderingar samlats i en Access-databas, se Figur 3. Genom denna är det möjligt att spåra data från en specifik sonderingspunkt för att jämföra modellens resultat. Underlag kommer dels från i Varbergstunnelprojektet genomförda sonderingar, dels äldre sonderingar från andra projekt samt SGU:s brunnarkiv.



Figur 3 Sonderingar i databas samt påverkansområde från PM Hydrogeologi (lila linje) (Sundlöf et al., 2016). Påverkansområdet från PM hydrogeologi har modifierats i senare handlingar.

Databasen är uppbyggd av ett antal tabeller och formulär för att titta på och bearbeta sonderingsdata. I formuläret "Sonderingspunkter" framgår information om en enskild sondering enligt Figur 4. Till detta formulär är två tabeller länkade. Tabellen "Sonderingspkter" innehåller information om sonderingspunkten såsom punktnummer, namn och koordinater, se Tabell 1. Denna tabell kan länkas in till GIS för att titta på sonderingarnas läge. Tabellen "SonderingJordlager" innehåller alla sonderingars jordlagerföljder.

Tabell 1 Rubriker i tabellen Sonderingspktr

PktNr	Unikt ID i databasen
Kartblad	Används inte

Namn	Sonderingens namn i ursprungskälla. För sonderingar från Varbergs kommun kombineras detta namn med numret i "ProjektSondering" för att återfinna ursprungskälla.
Undernamn	Används inte
X	X-koordinat
Y	Y-koordinat
Referensnivå	Referensnivå i RH2000
Angiven Referensnivå	Referensnivå enligt ursprungskälla. Sonderingar mellan 1970-01-01 och 2009-04-01 antas till höjdsystemet RH70. 10,5 cm har adderats på dessa för att beräkna om höjden till RH2000. Sonderingar äldre än 1970-01-01 antas till höjdsystemet RH00. 12,3 cm har adderats på dessa för att beräkna om höjden till RH2000.
Sonderingstyp	Anger sonderingstyp, flera val möjliga
TypAvStopp	Typ av stopp (90-95) enligt SGF:s beteckningssystem
Provtagare	Typ av provtagare för jordprovtagning, t.ex. skruv (skr) eller provgrop (pg)
DatumSondering	Datum för sondering. I vissa fall har datum för dokumentationen angetts.
Anmärkning	Anmärkning. T.ex. om den ursprungliga referensnivån har räknats om till RH2000 eller om referensnivån har saknats i ursprungsmaterialet så att den har beräknats från marknivåmodellen.
TolkatAv	JOSU = Jonas Sundell (Chalmers, COWI) Ezra = Ezra Haaf (GU), lagt in digital information från TLK, SND, PRV- filer samt från SGUs brunnsdatabas. AIGI = Alice Gisolo (COWI) AVMI = Angelica Vestgaard Majewski (COWI) JURN = Julia Rasmussen (COWI) unw = Ulrika Poole (COWI)
DatumInlagt	Datum då informationen är inlagd i databasen.
DatumJuster	Datum då informationen senast är justerad.

Källa	<ul style="list-style-type: none"> - Varbergs kommun arkiv - Tyréns = Geosuitefil levererad från Trafikverket 2017-09-15 - SGUs brunnarkiv - DWG-fil Lars Nilsson Tyréns = Levererat från Lars Nilsson Tyréns till Jonas Sundell 170906. Endast de punkter som inte finns med i annan information är inlagda. Information om jordlagerföljder har hämtats från systemhandlingens redovisning enligt kommentar i fältet "Anmärkning". - Varberg Tunnel update = Geosuitefil levererad från Christian Butrón, Trafikverket 2017-11-03. Utredning från Norconsult för Varbergs Kommun.
HöjdSystemOmrakn	Omräkning av höjdsystem enligt tidigare beskrivning
Riktning	Borrhålets riktning
Lutning	Borrhålets lutning
Tillfälligt nummer	Används ej
AnvandsEjiBergmodell	Kryssad ruta innebär att sonderingen inte blir inkluderad i bergnivåmodellen.
Jorddjup	Jorddjup i meter
KallaRefNev	Källa för sonderingens referensnivå

Inmatningsformulär för jordsonderingar

Kartblad
 Ej vald
 Alla

Sortera efter
 Namn
 Punktnummer
 X
 Y

Namn Punktnr

Punktnummer Datum Inlagt Används inte i bergmodt

Namn Datum Justerat Riktning

Undernamn Källa Lutning:

X Kartblad Jorddjup fr Geosult

Y Omräknat till höjdsystem i database

Referensivå angiven Höjdsystem SGI-beteckning. Vid flera separera med komma-tecken

Sonderingstyp Projekt Sondering

Datum Sondering Avslutn av sondering 90 Ej stopp, 91 Kan ej neddrivas, 92 Sten eller block, 93 Block eller berg, 94 Förmodat berg, 95 Jord-bergsonde

Provtagare SGI-beteckning. Vid flera separera med komma-tecken

Anmärkning Referensivå saknas. Angivna gv-rör (korttid), inget vatten vid sondering. Referensivå från 2m Lidar Tolkat av

Jordlagertab

	Djup till överkant	Jup till underkant	Typ	Anmärkning
▶	1	0,00	0,30	F
	2	0,30	3,60	Sa
	3	3,60	4,90	siLe
	4	4,90	10,00	x
*				

Records: of 4 No Filter Search

Figur 4 Utsitt ur formuläret "Sonderingspunkter" från Accessdatabasen.

3.3 Grundvattennivåer

Grundvattennivåmodellen är uppbyggd av grundvattennivåobservationer från Varbergstunnelprojektet samt övriga inventerade sonderingar. Medelnivåer har använts. Generellt är antalet observationstillfällen i enskilda grundvattenrör få.

3.4 Marknivåmodell

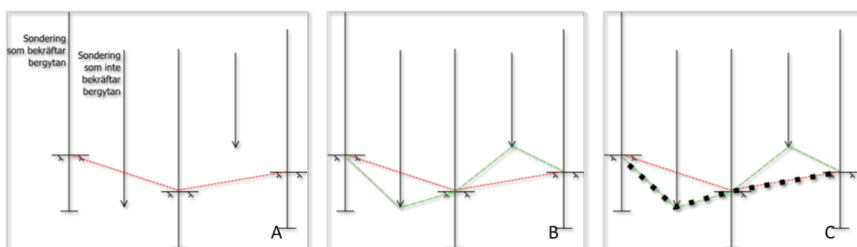
Laserskannad markyta med upplösning på 2x2 meter. För modelleringen har upplösningen justerats till 5x5 meter.

3.5 Utbredning av ytligt berg

Utbredning av ytligt berg används också som underlag för modellen. I områden där Tyréns har karterat ytligt berg har denna information använts. I områden utanför det karterade området baseras informationen på SGUs jordartskarta.

4 MODELL FÖR BERGYTANS NIVÅ

Bergytenivåmodellen beskriver bergöverytans nivå i meter över havet. För att beakta all tillgänglig information har modellen genomförts i flera steg. Både sonderingar som bekräftar bergytan och sonderingar som är avbrutna innan bergytan, har beaktats i modellen. Om endast sonderingar som bekräftar bergytans nivå skulle användas i en interpolering av bergnivå, är det möjligt att sonderingar som inte bekräftar bergytan har en underkant som är lägre än interpolationen, se Figur 5A. Trots att det finns information som visar att bergytan inom vissa områden ligger på en lägre nivå, skulle denna inte beaktas för detta fall. Om samtliga sonderingar skulle användas för att interpolera bergytan skulle det första fallet A inte inträffa, däremot skulle det finnas platser där bergytan uppenbart är för hög på grund av sonderingar som har avbrutits innan bergnivån har nåtts, detta fall illustreras av Figur 5B. Det bästa antagandet om bergytans nivå från tillgänglig information är därför den lägsta nivån från de båda interpolationerna A och B, se Figur 5C.



Figur 5 Interpolation med sonderingar till berg (A, röd linje), samtliga sonderingar (B, grön linje) och lägstanivån av de båda interpolationerna (C, svart streckad linje).

Jämfört med modeller i tidigare projekt genomförs ovan nämnda process i tre dataset istället för två som beskrivet ovan. För Varbergsprojektet har dessa dataset använts:

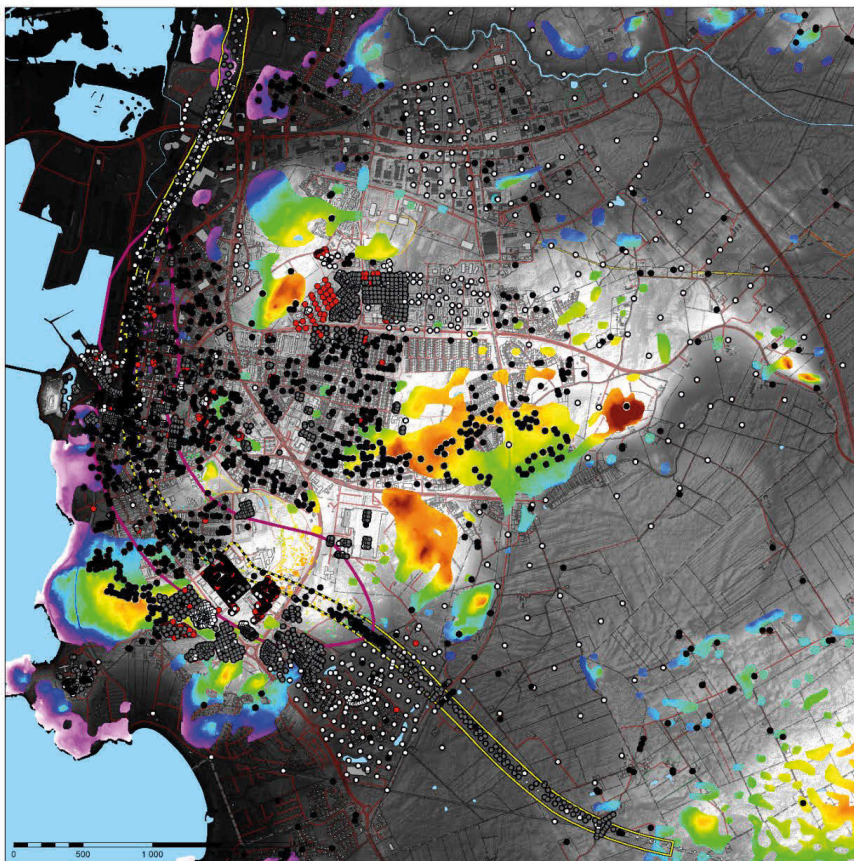
- Sonderingar som bekräftar bergytans nivå (stoppkod 94 eller 95) samt områden med berg i dagen.
- Sonderingar till fast botten (stoppkod 91-95) samt områden med berg i dagen.
- Bergnivå eller maxdjup i samtliga sonderingar.

Genom motsvarande metod som för två dataset har lägstanivån för dessa tre dataset använts för att göra ett bästa antagande om bergytans nivå.

4.1 Hantering av indata

Följande indata har använts vid modelleringen, se Figur 6:

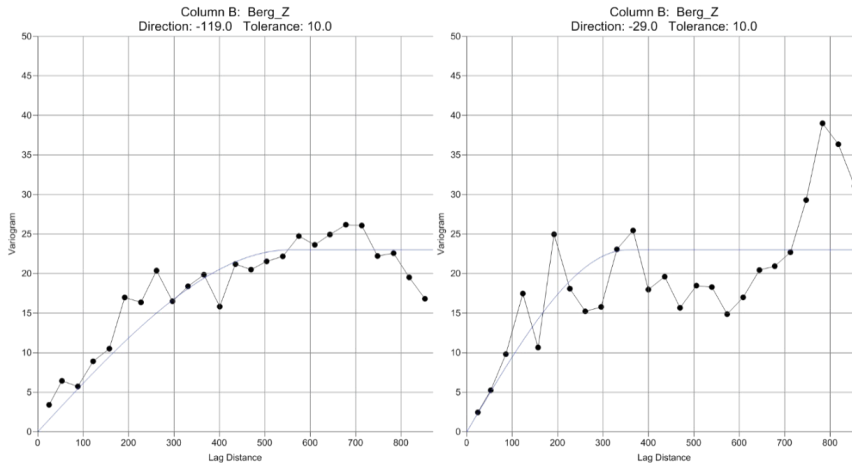
- *Sonderingar i förmodat berg* (dataset A). Svarta punkter i Figur 6. Jord- och bergsonderingar som går genom bergytan ingår i denna grupp. Sonderingar som har en stoppkod 94 eller 95 enligt SGFs, Svenska Geotekniska Föreningen, nomenklatur ingår i gruppen. Dessa stoppkoder innebär stopp mot förmodat berg respektive sondering i förmodat berg. 1780 sonderingar ingår i denna grupp.
- *Sonderingar till fast botten* (dataset B). Gråa punkter i Figur 6. I denna grupp ingår 3350 sonderingar.
- *Övriga sonderingar* (dataset C). Vita punkter i Figur 6. I denna grupp ingår övriga 4250 sonderingar.
- *Ytnära berg*. Färgade ytor i Figur 6. Detta område motsvarar platser markererade som ytnära berg. Det ytnära berget har tilldelats nivåer från marknivåmodellen. På en radie av 30 meter från en sonderingspunkt har nivåer från det ytnära berget inte använts då sonderingspunkten anses mer tillförlitlig än tolkningen av ytnära berg. De olika färgerna representerar olika höjdnivåer.



Figur 6 Sonderingar som har använts i bergnivåmodellen och områden med bergytan nära marknivån. Se förklaring till figurens symboler i punktlista ovan bild.

4.2 Variogram för bergytans nivå

I Figur 7 nedan redovisas variogram för bergytans nivå för två riktningar. Det experimentella variogrammet är beräknat från sonderingar som bekräftar bergövertytan i den centrala delen av Varberg. Det modellerade variogrammet beskrivs av en sfärisk modell. Inom området för modellen är det generellt korta avstånd mellan sonderingar. Därför är det viktigt att det modellerade- och det experimentella variogrammet visar god överensstämmelse på korta avstånd. Det modellerade variogrammet är därför optimerat för avstånd upp till 400 meter. Den bästa anpassningen har valts genom iterativa beräkningar med minsta kvadratmetoden. På avstånd större än 400 meter minskar överensstämmelsen mellan modellerat och experimentiellt variogram. Detta är inte av någon större betydelse inom modellområdet då dataunderlaget generellt har en hög täthet.



Figur 7 Variogram för sonderingar som bekräftar bergöverytan. Siffrorna anger riktning, -119 (den vänstra bilden) är i NNO riktning, -29 (den högra bilden) är i VNV riktning. Den horisontella x-axeln visar avstånd i meter (h) och den vertikala y-axeln variogram $\gamma(h)$. Experimentellt variogram från data; punkter, redovisas tillsammans med modellerat variogram; blå linje. Korrelationslängden uppnås på avstånd mellan 300 och 500 m beroende av riktning.

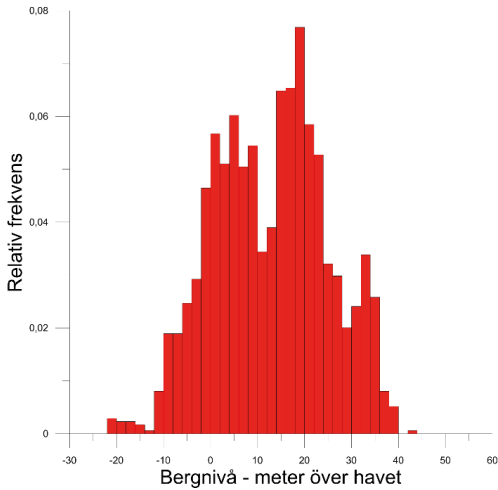
Från Figur 7 framgår att variogramvärdet varierar på olika avstånd beroende av riktning. Detta innebär att det finns anisotropi i data för sonderingar som bekräftar bergöverytan. Anisotropin innebär att om en punkt ska interpoleras så representerar sonderingar i riktning mot ett visst väderstreck denna punkt bättre jämfört med sonderingar i andra väderstreck. Väderstrecken i variogrammet i Figur 2 omfattar även den motsatta riktningen. Riktningen -119, NNO, innefattar således även riktningen, +61, SSV.

Variogramvärdet är generellt som lägst i riktningen -119 (NNO) jämfört med övriga riktningar. Variogramvärdet ökar sedan successivt till riktningen -29 (VNV). Den dominerande riktningen för dalgångarna i området är NNO. Det är därför logiskt att om en ny punkt ska interpoleras i en dalgång, representerar en sondering i samma riktning som en dalgång denna punkt bättre än en sondering på tvärs riktning mot dalgången. Vid den vidare interpolationen har detta inneburit att sonderingar i riktningen -119 från en punkt som ska interpoleras har fått större betydelse vid interpolationen jämfört med sonderingar i övriga väderstreck. Mellan dessa båda riktningar sker en gradvis övergång i hur datapunkter viktas in i modellen.

4.3 Interpolation med Kriging

Interpolationsmetoden kriging förutsätter normalfördelad data. Histogram över sonderingsdata visar också att normalfördelning är ett rimligt antagande för bergytan, se Figur 8. Möjligtvis kan erosion ha orsakat att bergtopparna generellt har mindre variation jämfört med dalgångarna. Denna möjliga avvikelse mot sonderingsdata, som i

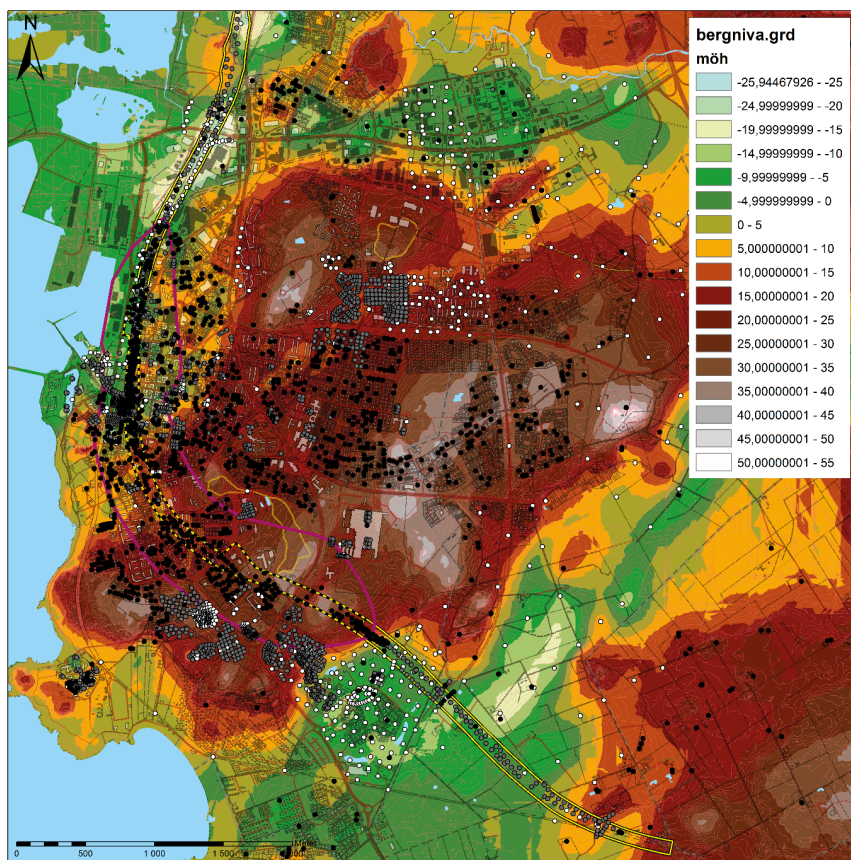
huvudsak finns i dalgångarna och vilka variogrammen baseras på, blir dock ändå representerad av den stora mängden data för ytnära berg.



Figur 8 Histogram med bergnivåer för sonderingar som bekräftar bergytans nivå.

Bergytemodelleringen genomförs i tre steg där vart och ett av de tre dataseten som nämndes tidigare interpoleras genom Kriging och variogram. I var och en av modellens griddpunkter beräknas den lägsta nivån av dessa tre interpoleringar eller markytenivåmodellen. Resultatet av denna beräkning utgör bergytanivåmodellen, se Figur 9.

Inom områden där avståndet mellan datapunkter är mindre än 300 meter bedöms modellen som rimlig. Områden med större avstånd mellan data eller där data saknas, som vid hamnen, bedöms modellen vara mindre tillförlitlig. Vid korsningen Getterövägen/Västkustvägen och fortsatt österut utmed sänkan där sonderingar saknas bedöms bergnivån ligga på ett större djup än vad modellen visar.



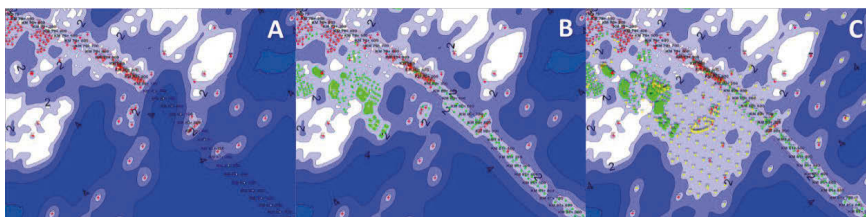
Figur 9 Resultat av bergnivåinterpolation.

4.4 Probabilistisk modell

Osäkerheter i bergytans nivå är av stor vikt vid beräkning av risk för om bergtäckningen är tillräcklig eller vid beräkning av marksättningar. Om bergytan är beräknad till en för hög nivå kan jordlagermäktigheten och lerans mäktighet underskattas vilket även innebär en underskattning av sättningens storlek. Om bergytan är beräknad till en för låg nivå överskattas jordlagermäktigheten och sättningens storlek riskerar att överskattas. Genom att beskriva möjliga utfall av bergytanivån för en viss plats, möjliggör detta vidare beräkningar av flera eventuella utfall av en marksättnings storlek.

Variogram i Figur 7 har använts för att beskriva hur osäkerheterna ökar med avstånd från en provtagningspunkt. I Figur 10 har standardavvikelsen beräknats från kriginginterpolationen. Vid interpolation med kriging genereras ett väntevärde och en standardavvikelse för var och en av de punkter som interpoleras. Standardavvikelsen beskriver prediktionsfelet i den aktuella interpolationspunkten.

I Figur 10 redovisas standardavvikelsen från interpolation med de tre olika dataseten (A, B, C) tillsammans med bergytan i dagen (vita sammanhängande områden) för en mindre del av området. Från figuren framgår att standardavvikelsen är mindre närmare sonderingspunkter jämfört med längre bort från dessa.

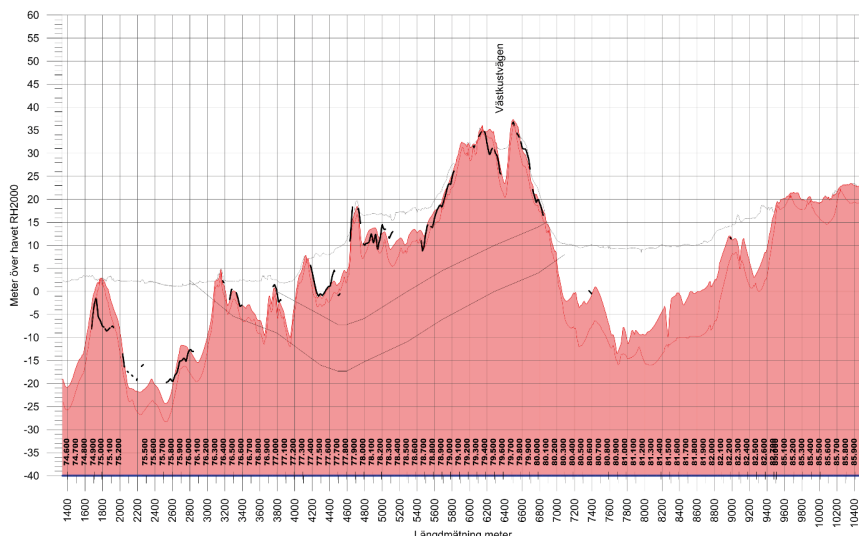


Figur 10 Standardavvikelse (meter över havet) från kriging-interpolationen. A visar standardavvikelse från interpolation med sonderingar till berg med stoppkod 94-95 (röda kors) och ytnära berg. B visar standardavvikelse från interpolation med sonderingar till berg, sonderingar med stoppkod 91-93 (gröna kors) och ytnära berg. C inkluderar även sonderingar som saknar stoppkod eller har 90 som stoppkod (gula kors). Vita ytor = standardavvikelse < 1, mörkblå ytor = standardavvikelse > 4.

Eftersom bergytan förutsätts variera med en normalfördelning kan de standardavvikelser som redovisas i Figur 10 användas för att beräkna samtliga möjliga bergytanivåer för en viss plats givet modellantagandena. Detta har genomförts enligt följande steg:

1. Medelvärdet för interpolation av dataset A och bergytan till dagen tillsammans med standardavvikelsen beskriven av Figur 10A.
2. Medelvärdet för interpolation av dataset B och bergytan till dagen tillsammans med standardavvikelsen beskriven av Figur 10B.
3. Medelvärdet för interpolation av dataset C och bergytan till dagen tillsammans med standardavvikelsen beskriven av Figur 10C.
4. Vid simulering av möjliga utfall måste alltid samma kvantil för steg 1, 2 och 3 jämföras och det lägsta värdet av dessa väljas. T.ex. måste medelvärdet av steg 1 jämföras mot medelvärdet av steg 2 och 3 och det lägsta värdet av dessa väljs. På samma sätt måste 10-percentilen i steg 1 jämföras mot 10-percentilen av steg 2 och 3 för att sedan välja det lägsta värdet av dessa tre. Detta sker genom att i varje realisering randomisera en kvantil från en uniform fördelning med värden mellan 0-1. Från denna kvantil väljs sedan motsvarande kvantil från normalfördelningarna för 1, 2 och 3. I ett sista steg väljs det lägsta värdet av dessa tre.
5. Beroende av antalet simuleringar som önskas fortsätter beräkningarna enligt 1-4. När antalet simuleringar som önskas har genomförts, kan fördelningar för var

och en av platserna där simuleringen har genomförts tas fram. T.ex. kan en fördelning med percentiler, medelvärde, median och standardavvikelse för bergytan redovisas. Det lägsta värdet vid jämförelse av motsvarande frekvens i 1, 2 och 3 skapar sedan den resulterande fördelningen för möjliga bergytanivåer.



Figur 11 Profil utmed tunnelns sträckning med längdmarkering i km (74.600 – 85.900). Den övre linjen visar markyta. Den övre röda visar medelvärde från simulering. Den undre röda visar 5:e lägsta percentil enligt simulering. Den svarta nivån visar nivåer från Tyréns bergnivåmodell (GIS-fil levererad från Trafikverket 2017-07-15).

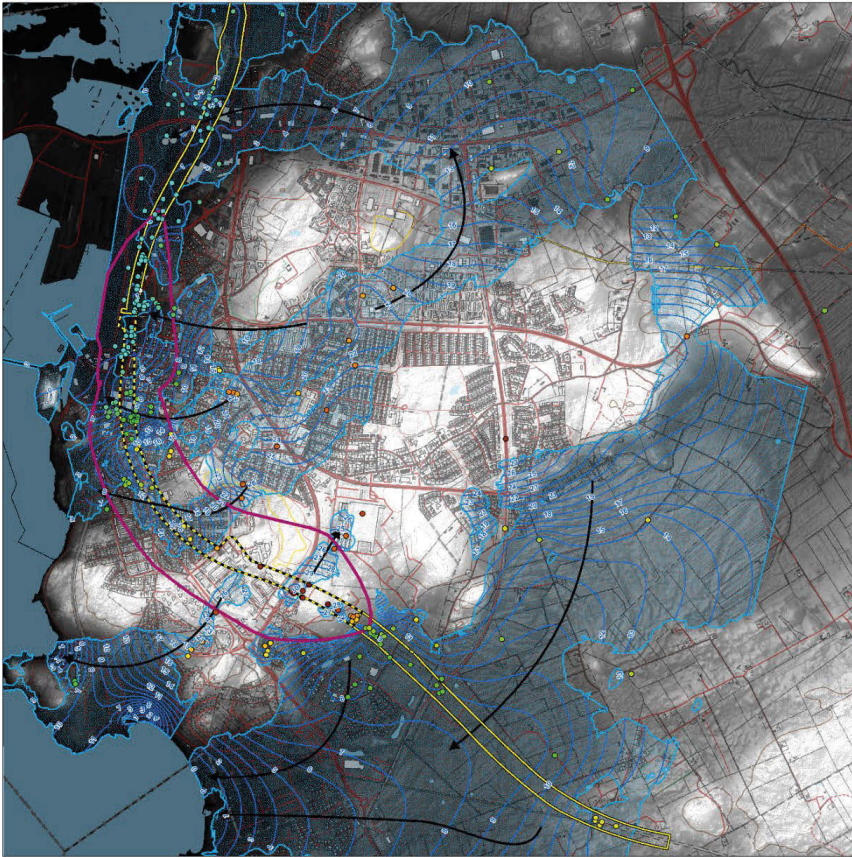
Medelvärde och 5:e lägsta percentil för bergytanivå utmed sträckan visas i Figur 11. Sannolikheten att en viss percentil, t.ex. den 5:e lägsta-percentilen skulle representera den verkliga bergnivån på samtliga platser samtidigt är mycket mindre än 5 procent. Däremot är det 5 procents sannolikhet att 5-percentilen inträffar på en plats om resterande interpolationspunkter betraktas oberoende av denna. Om 5-percentilen är den verkliga bergnivån på en plats är det samtidigt möjligt att någon annan percentil är den verkliga bergnivån på en annan plats. Interpolationspunkter nära varandra är i praktiken inte oberoende av varandra, däremot, som variogrammen visar, ökar oberoendet mellan interpolationspunkterna med avståndet.

5 GRUNDVATTENNIVÅMODELL

För att kunna bedöma grundvattenpåverkan och sättningsrisker är det viktigt att utgå från en verklighetsnära beskrivning av rådande grundvattenförhållanden och flödesmönster. I projektets nästa steg kommer detta att bedömas genom en probabilistisk grundvattennivåmodell. För att få en förståelse för den hydrogeologiska situationen i detta steg har istället en översiktlig grundvattennivåmodell skapats genom interpolation från 260 punkter. Dessa inkluderar främst grundvattenrör. Det finns dock områden som helt saknar grundvattenrör vilket innebär att annan geoteknisk grundvatteninformation utnyttjats i möjligaste mån. Det kan exempelvis handla om enstaka observationer från geotekniska sonderingar. För det stora antalet punkter har mättillfällena varit enstaka. Mätpunkter med längre serier visar generellt en variation om omkring 1 meter. Felmarginalen i interpolationen bedöms till denna storleksordning.

Den vertikala utbredningen av undre grundvattenmagasin begränsas nedåt av bergöverytan och uppåt av lera där sådan förekommer. Grundvattnet i det undre magasinet antas därför i huvudsak flöda i friktionsjorden närmast bergöverytan. I områden där det finns lera kan även ett övre grundvattenmagasin förekomma. Interpolerade grundvattenmagasin, interpolationsområdesgränser och indata vissas i Figur 12 för de fall magasinet är öppet och där det övergår till ett undre magasin.

Till skillnad från bergmodellen, som interpolerats med krigingmetoden, har metoden minimum curvature använts för grundvattenmodellen. De två metoderna ger snarlika resultat men med minimum curvature ges möjlighet att ansätta avgränsningar mellan närliggande interpolationspunkter. Detta gör att det interpolerade fältet inte direkt påverkas av information från punkter på motsatt sida om en avgränsning. Dessa avgränsningar har utnyttjats för att ansätta grundvattendelare utifrån höjddata i bergmodellen. Metoden minimum curvature ger också möjlighet att ansätta hög- och lågpunkter i det interpolerade fältet. Ett vattendrags utbredning sammanfaller med lokala lägstanivåer för grundvattenytan och den typen av information har även ansatts i modellen. Utbredningen av var magasinet i jord förekommer har beräknats genom skillnaden mellan den interpolerade grundvattennivån och bergytanivåmodellen.



Figur 12 Interpolerade mediagrundvattennivåer i det öppna magasinet och där det övergår till ett undre magasin tillsammans med bedömd utbredning av grundvattenmagasin i jord (blåa ytor) och huvudsaklig strömningsriktning i de olika magasinen (svarta pilar). Punkter visar de observationer som har använts för interpolationen.

6 JORDLAGERMODELL

Syftet med jordlagermodellen har varit att modellera läget för lerans över- och underkant då dessa avgränsar det undre magasinet i den vidare grundvattenmodellering samt för att dessa är kritiska för bedömning av risk för marksättning. En detaljerad indelning av de jordarter som förekommer över respektive under leran har inte varit ett modelleringsmål. Varbergs jordlagerföljd har conceptualiserats till att överst bestå av ett lager fyllnadsjord och ytligt förekommande svalljord, därunder ett lager lera och underst friktionsjord, Figur 13. I höjdområden där lera saknas och den svallade sanden förekommer har denna ansats till lager c. Denna uppdelning i tre lager är en kraftig förenkling då lagerföljden kan vara betydligt mer komplex vilket enstaka punkter visar med växellagrad lera. Förenklingen anses dock relevant med hänsyn till modellens syften. I och med förenklingen kan lermäktigheten inom vissa områden överskattas, vilket är ett konservativt antagande vid bedömningen av risk för marksättning. Modellens överkant avgränsas av markytenivåmodellen och dess underkant avgränsas av bergytenivåmodellen. I och med denna avgränsning skapas ett beroende mellan de enskilda jordlagrens mäktighet och berg- och marknivå. Det finns även beroenden mellan de enskilda jordlagren. För att hantera detta måste konvertering genomföras som tar hänsyn till att data är beroende av varandra. I och med att beroenden finns måste också modellen genomföras i flera steg. Hur beroenden har hanterats och modellering har genomförts förklaras nedan. Osäkerheter i lermäktigheten och lerans läge i jordprofilen är av stor betydelse vid beaktande av risk för marksättning. För att beakta osäkerheter har också en probabilistisk jordlagermodell tagits fram.

6.1 Hantering av indata

Från samtliga sonderingar som anger uppgifter om lera har lermäktigheten beräknats. Lermäktigheten har beräknats från den översta nivåangivelsen till den understa nivåangivelsen där lera förekommer, även i de fall där andra jordlager förutom lera förekommer däremellan. För att alltför tunna lerlager inte ska överskatta den totala lermäktigheten väljs jordlager tunnare än en decimeter bort innan denna beräkning sker. Dessa räknas istället till jordlagren som kommer över och under det borttagna jordlagret. Även om de tunna lagren plockas bort ur modellen förekommer platser där den totala lermäktigheten överskattas på grund av att modellen inte tar hänsyn till att det förekommer friktionsjord mellan lerlagren. Detta är ett konservativt antagande vid bedömning av risk för marksättning.

Enligt motsvarande princip som för bergnivåmodellen har sonderingar där lera ingår i tolkningen grupperats i två grupper. I den första gruppen ingår sonderingar där det kan antas att hela lermäktigheten har sonderats igenom (252 st. sonderingar). I den andra gruppen ingår utöver dessa sonderingar som har avbrutits utan att hela lermäktigheten har sonderats (512 st. sonderingar). Utöver dessa två grupper ingår ett tredje urval där hela jordlagermäktigheten har sonderats ner till fast botten eller berg utan att lera har

påträffats (192 st. sonderingar). Övriga sonderingar, det vill säga sonderingar där hela profilen till fast botten eller berg inte är jordartsbestämd används inte i jordlagermodellen.

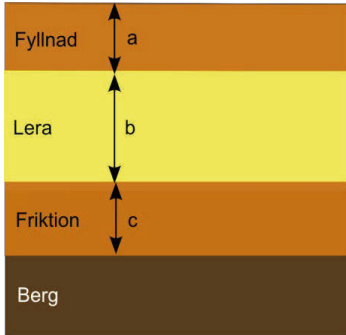
Modellererna för mark- och bergöveryta utgör övre och undre gränser för jordprofilen. I ett första steg i modelleringen av jordlager interpoleras lerans överkant genom mäktigheten av det översta jordlagret, a , se Figur 13 och ekvation nedan. Från skillnaden mellan lerans överkant och bergnivån har andelen lera beräknats, se Figur 13 och ekvation nedan. Inom flera områden där utfyllnad och schakt har skett inom årens lopp skiljer sig referensnivån för sonderingar jämfört med den laserscannade marknivåmodellen. Eftersom den vidare modelleringen utgår från marknivåmodellen används denna istället för sonderingens inmätta överkant. För de sonderingar som inte når till berg har bergets nivå antagits från bergnivåmodellen.

Andelen fyllnadsjord av den totala jordlagermäktigheten, p_a , definieras som:

$$p_a = \frac{a}{a + b + c}$$

Andelen lera av den totala jordlagermäktigheten, p_b , definieras som:

$$p_b = \frac{b}{b + c}$$

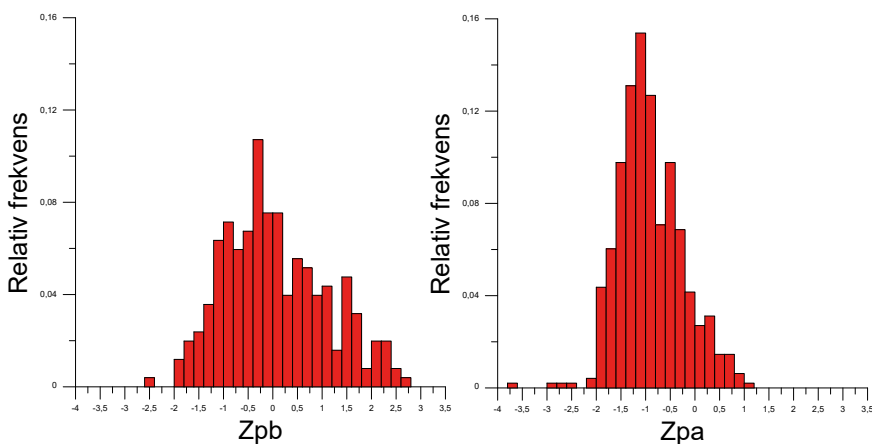


Figur 13 Konceptuell profil där jordmäktigheten; a , b och c , markeras för respektive jordlager; fyllnad, lera friktion.

Genom omvandlingen till proportioner kan respektive jordlagers andel simuleras oberoende av bergnivån. En fördel med detta angreppssätt jämfört med att direkt interpolera lerans underkant är att det finns fler sonderingar som används för bergnivåmodelleringen jämfört med för jordlagermodelleringen. För platser där det finns uppgifter om bergnivån men inte om jordlager ger den interpolerade proportionen på den platsen lerans mäktighet och underkant. Detta är ett geologiskt rimligt antagande då lermäktigheten är beroende av den totala jordmäktigheten.

För de sonderingar som helt saknar lera och enbart består av friktionsjord har hela jordlagerföljden antagits tillhöra det understa lagret c.

Interpolering med kriging förutsätter normalfördelad data. En proportion kan anta värden mellan 0 och 1. Värdet 0 innebär att ett visst jordlager saknas helt och värdet 1 innebär att det är det enda jordlagret som finns. Eftersom normalfördelningen är kontinuerlig och kan anta värden utanför detta spann, måste p_a och p_b transformeras så att dess värden kan representeras av en normalfördelning. En lämplig transformation är att proportionerna representerar fördelningsfunktionen för den standardiserade normalfördelningen med medelvärde 0 och standardavvikelsen 1. Genom detta kan sannolikheterna i sin tur transformeras till den standardiserade normalfördelningens värden, z . Resultatet av denna transformation framgår av Figur 14.



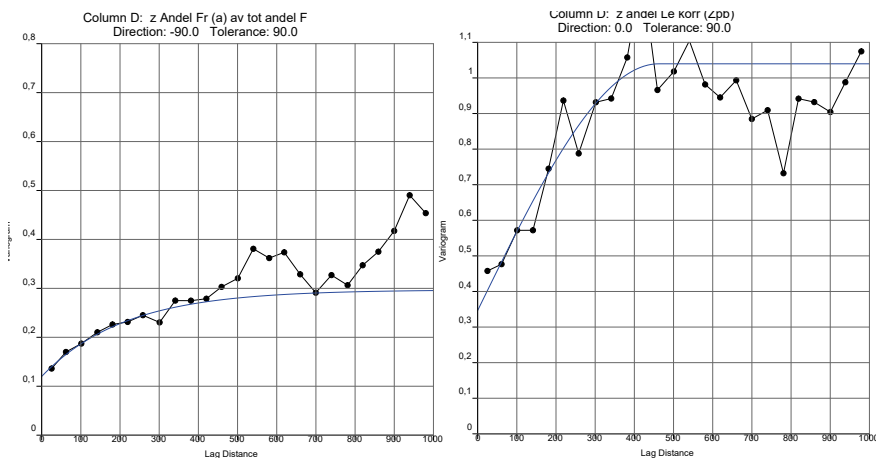
Figur 14 Resultat av transformation av p_b och p_a till den standardiserade normalfördelningens värden z . För z_{pa} visas endast de värden där det har antagits att hela lermäktigheten har sonderats igenom.

Från Figur 14 framgår att transformationen av p_a och p_b för z -värden väl kan beskrivas av normalfördelningen. För den vidare beräkningen har de fall där hela jordlagerprofilen tolkats att endast bestå av lera, $p_b = 1$, antagits till $p_b = 0,99$. För normalfördelningens z -värden skulle $p_b = 1$ motsvara oändligheten, $z(p_b = 0,99)$ motsvarar istället z -värdet 2,33. Motsvarande gäller de proportioner som är 0, dessa har antagits till 0,01, vilket motsvarar z -värdet -2,33. Motsvarande antagande har gjorts för det översta jordlagret, a . Dessa antaganden innebär att samtliga lager (a, b, c) alltid finns i modellen även om de ibland kommer att vara mycket tunna.

6.2 Variogram för jordlager

På motsvarande sätt som vid interpolation av bergöverytans nivå har variogram beräknats proportionerna p_a och p_b transformerade till normalfördelningens z -värden (z_{pa} och z_{pb}), se Figur 15. De experimentella variogrammen för är beräknade från

sonderingar där proportionen för respektive jordlager p_a och p_b ; $0 > p > 1$. Till de experimentella variogrammen har en matematisk modell anpassats som beskriver det modellerade variogrammet. Den bästa anpassningen har valts genom iterativa beräkningar med minsta kvadratmetoden. Den anpassade variogrammodellen är det som används i interpoleringen.



Figur 15 Variogram för Z_{pa} (vänster) och Z_{pb} (höger), lermäktighetens andel av skillnaden mellan lerans överkant och bergnivån transformerat till den standardiserade normalfördelningens värden, z . Endast sonderingar med proportionen $0 > p > 1$ har använts för att skapa variogrammen. Den horisontella x-axeln visar avstånd i meter och den vertikala y-axeln varians. Experimentellt variogram från data; punkter, redovisas tillsammans med modellerat variogram; blå linje. Nugget är c.a. 0,12 och 0,35 för Z_{pa} respektive Z_{pb} . Korrelationslängd är ca. 400 m för båda variogrammen.

Till skillnad från variogrammen för sonderingar till bergytans nivå framgår en så kallad nugget-effekt (se 2.1.2) tydligt i variogrammen för jordlager. Eftersom variogrammen i Figur 15 inte utgår från origo förekommer osäkerheter även i provtagningspunkten. Nugget-effekt framträder på grund av att två sonderingar mycket nära varandra har gett upphov till olika resultat. Att nugget-effekt framgår tydligt för jordlagermodellen men inte i bergmodellen, beror sannolikt på att det är svårare att sondera en exakt jordlagerindelning jämfört med bergnivå. Nugget-effekt kan delvis också bero på att leran har förenklats till att endast bestå av ett lager istället för, som ett urval sonderingar visar, flera lager. I modellen innebär en nugget-effekt att standardavvikelsen i provtagningspunkten kommer att vara över noll.

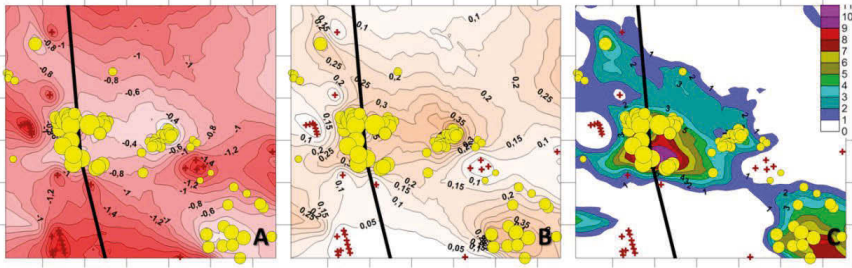
På avstånd om ca 300 meter börjar variogrammen att plana ut. På det avstånd där utplaningen är uppnådd nås korrelationslängden, det största avstånd där man kan se ett inflytande från en enskild mätpunkt. På detta avstånd motsvarar variogrammets varians variansen för hela datamängden. När korrelationslängden är uppnådd innebär det att en

enskild mätpunkt inte längre påverkar osäkerheterna. Osäkerheterna på detta avstånd motsvarar då de osäkerheter som ges av variansen för hela urvalet.

6.3 Interpolationssteg

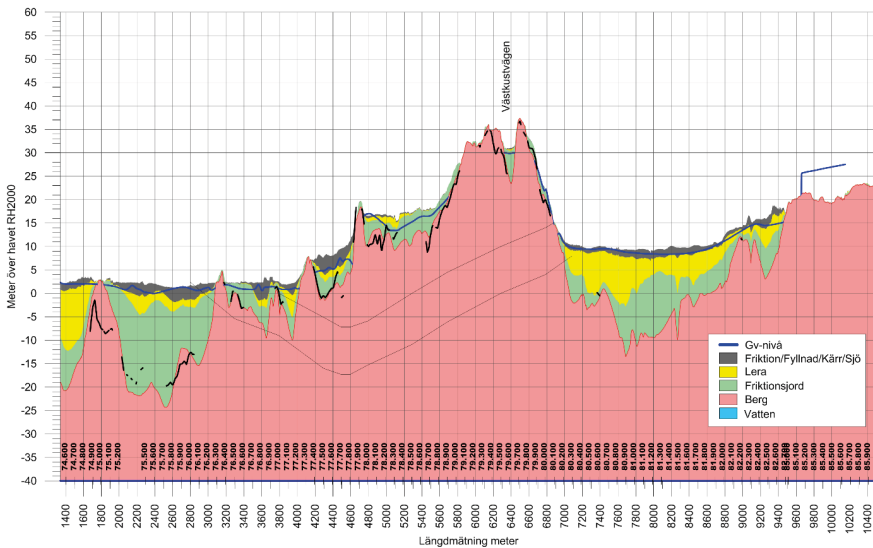
Eftersom respektive jordlayers mäktighet beräknas via den standardiserade normalfördelningens värden z och som en proportion måste interpolationen genomföras i flera steg. Interpolering genomförs med Kriging och de variogram som presenteras i kapitel 6.2.

- A. Andelen av det översta lagret konverterat till normalfördelningens värden, z_{pa} , interpoleras genom kriging och variogram i Figur 15.
- B. Interpolationsresultatet av A räknas om från normalfördelningens värden, z_{pa} , till proportionen p_a . Den totala jordlagermäktigheten (skillnaden mellan bergnivåmodellen och marknivåmodellen) multiplicerat med p_a ger mäktigheten av det översta jordlagret, a .
- C. För sonderingar där hela lermäktigheten har sonderats igenom beräknas proportionen p_{b1} och normalfördelningens värden z_{pb1} . z_{pb1} interpoleras genom kriging och variogram i Figur 15.
- D. På samma sätt som i steg C interpoleras sonderingar där hela lermäktigheten inte har sonderats igenom, z_{pb2} genom kriging och variogram i Figur 15.
- E. Det största värdet (motsvarar den största proportionen) av C och D väljs i varje griddpunkt enligt samma princip som för bergnivåmodellen (där den lägsta nivån väljs).
- F. Resultatet av E räknas om från normalfördelningens värden, z_{pb} , till proportionen p_b .
- G. Genom andelen andelen lera (p_b) och mäktigheten av $b+c$ (skillnaden mellan den totala jordmäktigheten och a) kan lermäktigheten i modellen beräknas. Resultatet av denna beräkning framgår av Figur 16C. På motsvarande sätt beräknas mäktigheten av övriga jordlager.

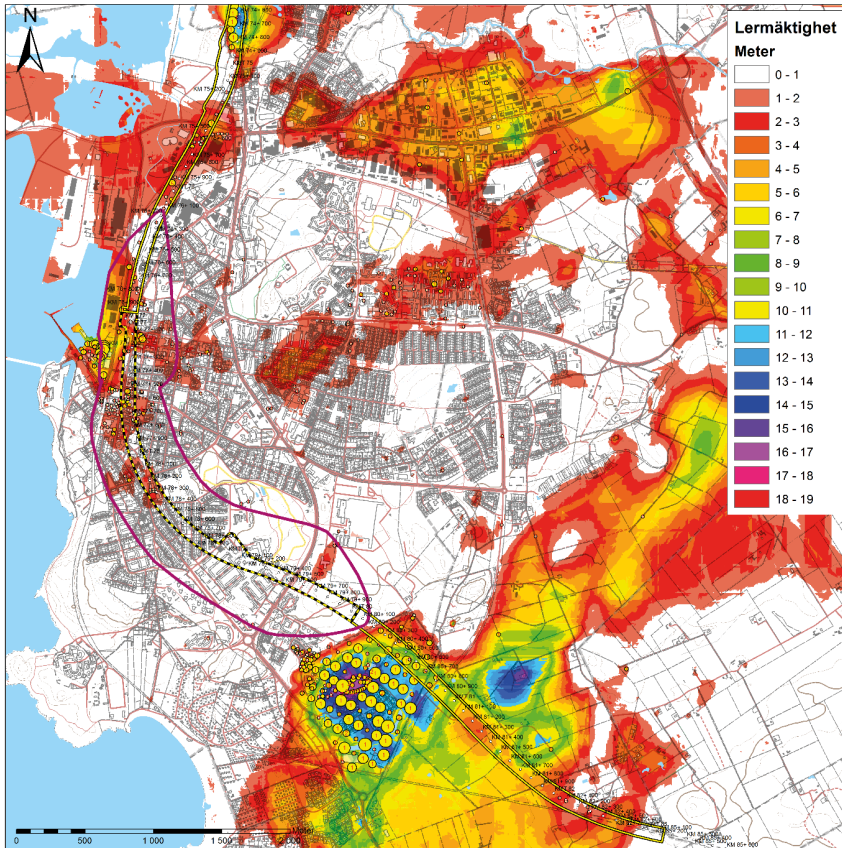


Figur 16 Steg vid interpolation av lermäktighet; det mittersta jordlagret b. Gula punkter visar sonderingar med lera (desto större punkt, desto mäktigare är leran). Röda kors visar sonderingar som inte innehåller lera. I A visas interpolationen och sonderingarnas värde av Z_{pb} . I B har interpolationsresultatet av Z_{pb} räknats ut till proportionen p_b . I C har lermäktigheten i meter beräknats från p_b och skillnaden mellan lerans överkant och bergets nivå.

Från den totala jordlagermäktigheten, mäktigheten av lager *a* och *b* kan mäktigheten av lager *c* (det undre grovkorniga materialet) beräknas. Genom att marknivån är känd och samtliga jordlagermäktigheter är kända kan över- och underkanten för respektive lagers nivå beräknas. Resultatet av denna beräkning visas i jordprofilen i Figur 17. En karta med den modellerade lermäktigheten visas i Figur 18.



Figur 17 Profil utmed tunnelns sträckning med längdmarkering i km (74.600 – 85.900). Nivå för lerans över- och underkant har beräknats enligt kapitel 6.3. Grundvattennivån har beräknats enligt kapitel 5 (felaktig efter längdmätning 9600). Bergytans nivå har beräknats enligt kapitel 4.3.



Figur 18 Modell för lerans mäktighet tillsammans med sonderingar med lera (gula punkter i olika storlekar).

6.4 Probabilistisk modell

På motsvarande sätt som i fallet för beräkning av bergytan kan variogrammen användas för att beskriva hur osäkerheterna ökar med avstånd från en provtagningspunkt. Vid interpolation med Kriging beräknas väntevärden och standardavvikelser för z_{pa} , z_{pb1} och z_{pb2} på samma sätt som för bergnivåmodellen. Dessa beräkningar används för den probabilistiska modellen.

Den probabilistiska beräkningen av lermäktigheten har genomförts enligt följande steg:

1. Ett värde för bergöverytan simuleras enligt beskrivning i kapitel 4.4.
2. Den totala jordlagermäktigheten, J_{tot} beräknas genom differens mellan markytan och bergöverytan för denna simulering.

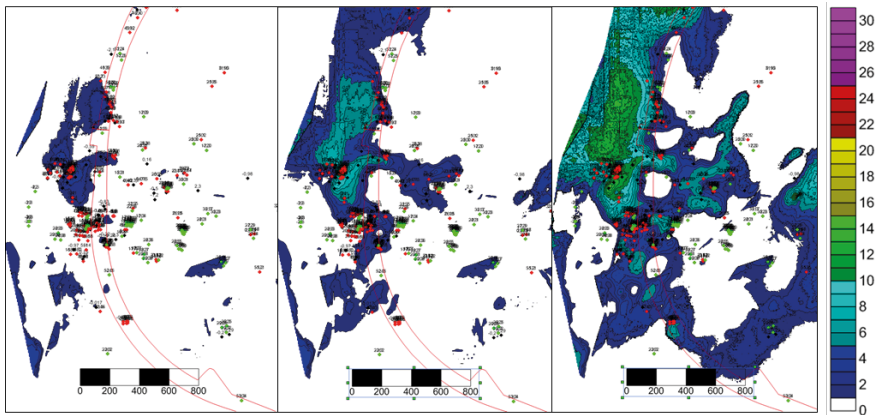
3. Ett värde för Z_{pa} simuleras från en normalfördelning där medelvärdet representeras av den tidigare interpolationen av Z_{pa} och standardavvikelsen enligt tidigare beskrivning.
4. Det simulerade värdet för Z_{pa} konverteras till p_a .
5. Mäktigheten för a beräknas genom $p_a * j_{tot}$.
6. Ett värde för mäktigheten av lager $j_{b+c} = b+c$, beräknas från $j_{tot} - a$.
7. På samma sätt som för bergnivåmodellen (men oberoende av denna) randomiseras en kvantil från en uniform fördelning med värden mellan 0-1 för varje realisering.
8. Baserat på steg 7 väljs motsvarande kvantil från normalfördelningen för Z_{pb1} som representeras av den tidigare interpolationen av Z_{pb1} och standardavvikelsen enligt tidigare beskrivning.
9. På motsvarande sätt som i steg 8 väljs samma kvantil från normalfördelningen för Z_{pb2} .
10. Det största värdet av Z_{pb1} och Z_{pb2} väljs till Z_{pb} .
11. Det simulerade värdet för Z_{pb} konverteras till p_b .
12. Lermäktigheten, b , beräknas enligt: $b = p_b * j_{b+c}$.
13. Nivån för gräns mellan respektive jordlager a , b och c beräknas.
14. Beroende av valet av antalet simuleringar fortsätter beräkningarna enligt 1-13. I detta projekt har antalet simuleringar som genomförts valts till 1000. När samtliga simuleringar har genomförts har fördelningar för var och en av platserna där simuleringen har genomförts tagits fram. Från dessa kan t.ex. percentiler, medelvärde, median och standardavvikelse för lermäktighet och nivåer redovisas.

Enligt motsvarande resonemang som för bergnivåmodellen ska värdet i interpolationspunkterna betraktas var för sig. En viss percentil för lermäktigheten kan representera det verkliga värdet på en plats, t.ex. den 5:e, samtidigt som en annan percentil, t.ex. den 95:e, representerar det verkliga värdet på en annan plats.

6.5 Riskområde för marksättning

För sättningsberäkningar är det av intresse att veta om grundvattennivån överstiger lerans underkant eller inte. Med antagandet om att det inte är någon kapillär stighöjd av betydelse i friktionsjorden kan en grundvattensänkning endast orsaka en sättning i leran där grundvattnets trycknivå ligger över lerans underkant. Det är därför viktigt att veta

inom vilka områden dessa förutsättningar kan vara uppfyllda. Steg 1-14 ovan tillsammans med den tidigare redovisningen av beräkningen av grundvattennivå i kapitel 5, kan också användas för att beräkna sannolikheten för hur stor del av lermäktigheten där trycknivån i det undre magasinet överstiger lerans underkant. Detta område kallas "blöt lera". Resultatet av denna beräkning redovisas i Figur 19 och Figur 20.

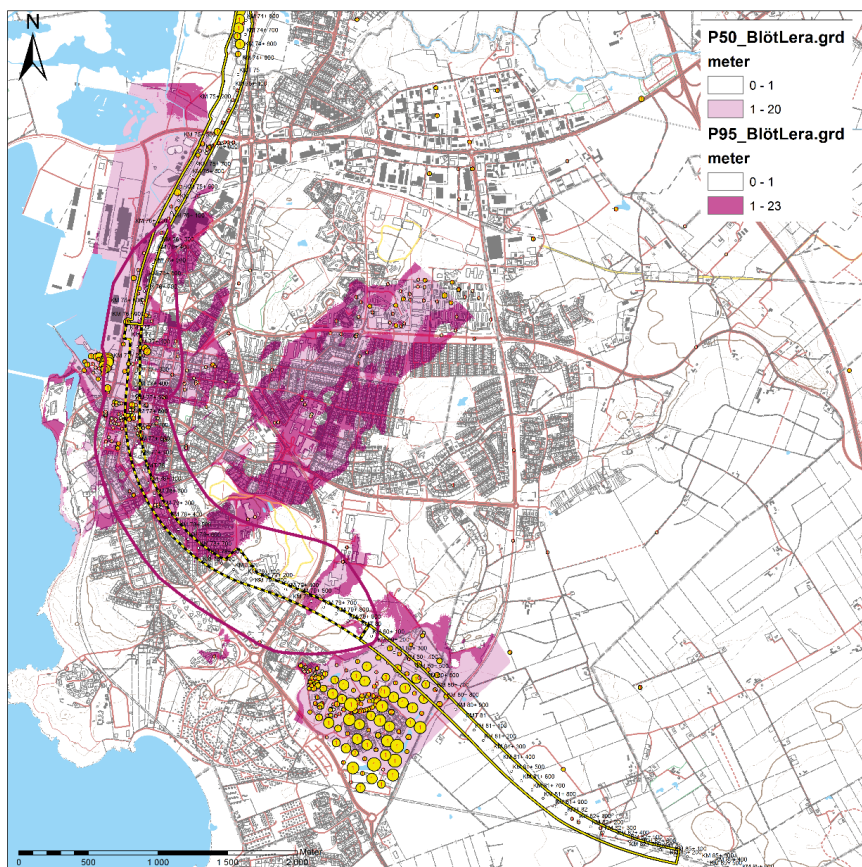


Figur 19 Modellerig av mäktigheten lera (meter) som täcks av grundvattennivån i det undre magasinet, meter. Bilden visar den 5:e, 50:e och 95:e percentilen. Antalet simuleringar har varit 1000.

Figur 19 visar skillnaden i mäktighet för blöt lera för 50:e till 95:e percentilen för den centrala delen av Varberg. På grund av de stora provtagningsfelen (nugget-effect) för lera, se Figur 15, visar simuleringen där lermäktigheten är som störst, att intervallet för blöt lera varierar från omkring 8 meter i 5:e percentilen till omkring 14 meter i 50:e percentilen och 16 meter i 95:e percentilens.

Samtidigt som det finns områden med stor varians finns det områden som helt saknar blöt lera i såväl den 50:e som den 95:e percentilen. För den 95:e percentilen är sannolikheten för mer än en meter blöt lera mindre än fem procent i de vita områdena i Figur 19. Gränsen kan användas för att definiera ett riskområde inom vilket det är möjligt att en grundvattensänkning skulle kunna orsaka en marksättning. Utanför riskområdet är sannolikheten för en marksättning till följd av en grundvattensänkning liten.

Gränsen för en meter blöt lera för den 50:e och den 95:e percentilen för hela området framgår av Figur 20. Även om dessa områden utgör riskområden för marksättningar är det flera förutsättningar som behöver vara uppfyllda för att skadliga sådana ska ske såsom en grundvattensänkning och en känslig grundläggning för skadeobjektet. Sättningens storlek är också beroende av lerans kompressionsegenskaper samt tidsperioden för grundvattensänkningen.



Figur 20 Riskområde för marksättning. Den ljusrosa ytan visar området där blöt lera för den 50:e percentilen > 1 m. Den mörkrösa ytan tillsammans med den ljusrosa visar området där blöt lera för den 95:e percentilen > 1 m.

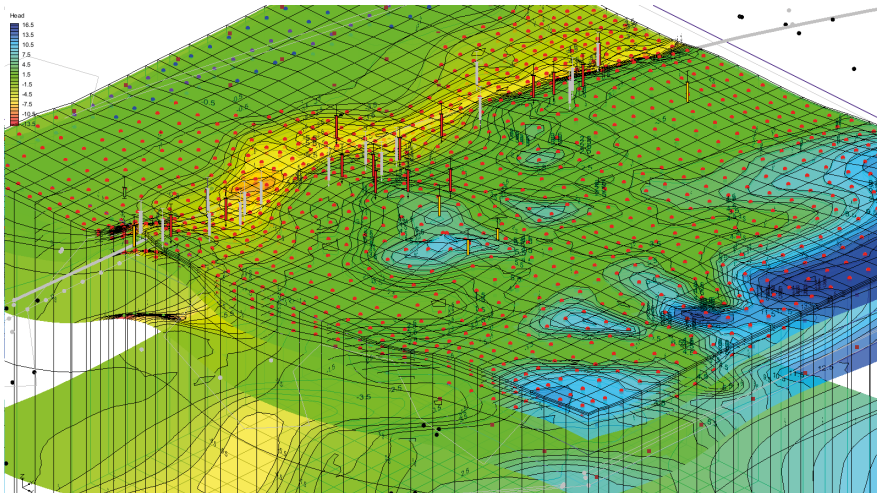
7 REFERENSER

- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., & Knovel. (1989). *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- Sundell, J. (2015). *City Link etapp 2 - PM Metodbeskrivning Geomodell*. Retrieved from
- Sundell, J., Aronsson, S., & Linderholm, K. (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
- Sundell, J., Haaf, E., & Malm, J. (2016). *PM Beskrivning Hydromodell*. Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/c19fd7547e2b493688f3cc0576742d31/26_8_pm_beskrivning_hydromodell.pdf
- 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*, n/a-n/a. doi:10.1111/risa.12890
- Sundell, J., Rosén, L., Norberg, T., & Haaf, E. (2016). A probabilistic approach to soil layer and bedrock-level modelling for risk assessment of groundwater drawdown induced land subsidence. *Engineering Geology*, 203(Special Issue on Probabilistic and Soft Computing Methods for Engineering Geology), 126-139. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.11.006>
- Sundlöf, B., Martinsson, S., Simonsson, D., Åkesson, M., & Aneljung, M. (2016). *Projekterings-PM Hydrogeologi*. (101107-08-025-250). Göteborg: Trafikverket.

DEL 2

INVERS PROBABILISTISK MODELLERING AV FÖRÄNDRADE GRUNDVATTENNIVÅER

VARBERGSTUNNELN



INNEHÅLL

1	Inledning	51
1.1	Syfte med modellen	51
1.2	Höjd och koordinatsystem	52
2	Metod	53
3	Tillgänglig information	59
4	Konceptuell modell	61
5	Materialegenskaper och grundvattenbildning	65
6	Kalibreringsmål	67
7	Numerisk modell	69
8	Kalibrerad modell	73
9	Invers probabilistisk kalibrering	77
10	Modellering av alternativ	85
10.1	Alt 1 (VF4i) – Helt utan tätning	86
10.2	Alt 2 (VF4j) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-7$ m/s	88
10.3	Alt 3 (VF4k) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s	89
10.4	Alt 4 (VF4l) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under schakt.90	
10.5	Alt 5 (VF4m) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under och vid sidan om schakt	91
10.6	Jämförelse av grundvattensänkning mellan alternativ 1-5	92
11	Referenser	95

I INLEDNING

I tidigare utredningar för den planerade Varbergstunneln har flera hydrogeologiska undersökningar genomförts i området för att skapa en bättre förståelse av det hydrogeologiska systemet. Eftersom de hydrogeologiska förhållandena i berg och jord kännetecknas av en betydande heterogenitet kan inte dessa undersökningar beskriva systemet i detalj, vilket innebär att osäkerheter förekommer.

I denna handling redovisar vi resultatet av en probabilistisk grundvattenmodellering som beaktar möjliga utfall av ett antal scenarier för design av tätning och dränering kring tunneln. Eftersom grundvattenmodelleringen är probabilistisk kan osäkerheterna som beror på områdets heterogena förhållanden beaktas. Till skillnad från tidigare modellering i FEFLOW redovisar vi i denna rapport flera olika grundvattenmodeller där samtliga är hydrogeologiskt rimliga men med betydande skillnader i parameteruppsättning för samma kalibreringsmål. Programvaran GMS används tillsammans med grundvattensimuleringsprogrammet MODFLOW och kalibreringsverktyget PEST (Parameter ESTimation code) för att genomföra simuleringarna.

Modelleringen utgår från att det förekommer en variabilitet i de hydrogeologiska egenskaperna för respektive jord- och bergmaterial. Variabilitetens övre- och undre nivåer ansätts utifrån vad som är rimligt för respektive material. Som exempel varierar den hydrauliska konduktiviteten för en grovkornig jord inom ett större intervall jämfört med en lera. Eftersom egenskaperna är heterogena inom respektive material utgår modelleringen från att egenskaperna kan variera mellan olika platser. Principen för kalibreringen med PEST och MODFLOW är att flera olika modeller där samtliga är rimliga men med betydande skillnader i parameteruppsättning, kan uppnå samma kalibreringsmål. Denna princip uppfylls genom att simulera parametervärden inom de intervall som är ansatta för respektive material. Simuleringen för en modell pågår tills dess att tillräckligt god anpassning till observerade grundvattennivåer har uppnåtts. Denna process upprepas sedan för flera modeller ett bestämt antal gånger. Till sist erhålls flera modeller med olika parameteruppsättningar där samtliga uppfyller samma kalibreringsmål. I nästa steg, när en störning i form av en tunnel med en viss tätning och dränering läggs in i modellen kommer de olika modellerna att svara olika på störningen. Från detta erhålls flera möjliga scenarion för hur grundvattensituationen i form av nivåer och vattenbalans påverkas vid en störning. Ur denna information kan sedan skattningar av sannolikheter att olika förhållanden, så som en oönskat stor grundvattensänkning, ska uppstå vid en störning. Modellen täcker den del av tunneln som redovisas av Figur 3.

1.1 Syfte med modellen

Det övergripande syftet med modellen är att beskriva osäkerheter i grundvattenströmning och vattenbalans dels för en kalibrerad modell utan en tunnel, dels för ett antal scenarier med dränering och tätning av den planerade Varbergstunneln.

Genom denna modellering kan t.ex. sannolikheten för att en viss grundvattensänkning överskrids beräknas. Nedan listas ett urval av modellens detaljerade syften:

- Modellering av förändrade grundvattennivåer och osäkerheter i dessa för ett antal scenarier.
- Modellering av heterogenitet och osäkerheter i hydraulisk konduktivitet för de material (jord och berg) som ingår i modellen.
- Underlag för bedömning av områdets känslighet för marksättningar orsakade av grundvattensänkning.
- Underlag för bedömning av spridningsbild från förorenade områden.
- Visualisering. Genom modellen kan den rådande och förändrade grundvattensituationen presenteras på ett åskådligt sätt.

1.2 Höjd och koordinatsystem

Höjdsystem är RH2000. Koordinatsystem är SWEREF 99 TM. Samtlig data har konverterats om till dessa format. Interpolation har genomförts med en upplösning om 5 x 5 meter.

2 METOD

I detta avsnitt beskrivs tillvägagångssättet för grundvattenmodelleringen. Den övergripande processen följer de principer som föreslås av t.ex. Reilly (2001), Freeze et al. (1990) och LeGrand and Rosén (2000), se Figur 1. Jämfört med nämnda referenser har processer för probabilistisk modellering lagts till i kedjan.

I ett första steg definieras målet med modellen. Modellens mål styr sedan resterande delar. Det är därför inte säkert att en befintlig modell kan svara på andra frågeställningar än de den har definierats för. I nästa steg samlas befintlig information in i form av övergripande geologi, hydrogeologiska undersökningar, geotekniska undersökningar, klimat och rådande avrinningsförhållanden.



Figur 1 Övergripande process för grundvattenmodellering.

Baserat på de första två stegen kan en konceptuell modell definieras. Denna modell ska beskriva hur grundvatten bildas eller strömmar in i modellen, hur grundvattnet strömmar inom modellen samt hur grundvattnet strömmar ut ur modellen. I samtliga dessa delar beaktas den geologiska uppbyggnaden. Hur grundvattnet strömmar in och ut

ur modellen utgör dess randvillkor. Grundvattenbildning sker dels från perkolation från regn (nettonederbörden subtraherat med ytavrinningen) men också från läckande ledningar, sjöar och vattendrag och infiltration för att upprätthålla grundvattennivåer. Om grundvattenströmning sker från ett område som modellen inte täcker kan ränder med konstanta grundvattennivåer ansättas om dessa kan antas vara stabila och inte påverkas av en störning som läggs in i modellen. Hur grundvattnet strömmar inom modellen definieras främst genom att beskriva vilka material i jord och berg som finns och om de främst utgör flödesvägar eller barriärer för grundvattnet. För Varberg baseras denna beskrivning till stor del på den tidigare upprättade jordlager- och bergnivåmodellen. I det sista steget beskrivs hur grundvattnet strömmar ut ur modellen genom utflöde till ytvatten eller avdunstning genom markvattenzonen.

När den konceptuella modellen har definierats kan den parametreras genom att ansätta värden för bland annat grundvattenbildning och hydraulisk konduktivitet för de olika materialen samt variabilitet i dessa. Dessa värden ansätts dels från generella kunskaper om respektive material, dels från plats specifika undersökningar. Om undersökningarna kan anses vara tillförlitliga för en viss plats och parameter kan variabiliteten minskas för denna.

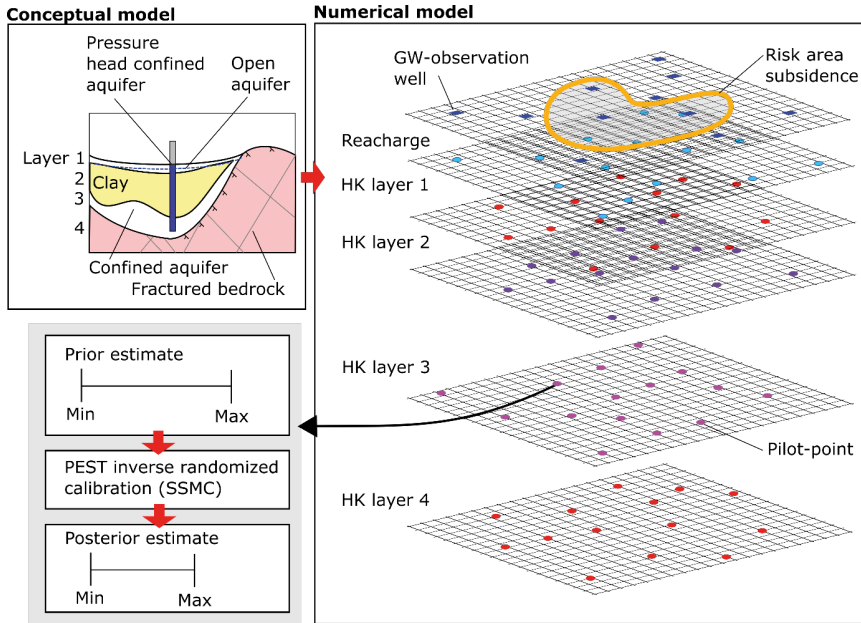
Ett kalibreringsmål beskriver hur väl modellen ska stämma överens med tillgängliga observationer. Om en icke-tidsberoende, dvs. en konstant modell används är det nödvändigt att känna till hur mycket de valda observationerna kan variera över tid för att ansätta ett rimligt mål. I kalibreringen ska också en rimlig vattenbalans uppnås.

Den numeriska modellen är uppbyggd i finit-differens grundvattenssimuleringskoden MODFLOW (Harbaugh, 2005) med NWT som lösningsalgoritm (Niswonger et al., 2011) i det grafiska användargränssnittet GMS (Aquaveo, 2017). Denna modellering baseras på Darcys lag, $q = K \frac{\Delta h}{\Delta l}$ som beskriver det proportionella sambandet mellan flödes hastigheten för vattenvolymen (q) genom ett poröst medium, mediets hydrauliska konduktivitet (K) och grundvattnets tryckgradient ($\Delta h/\Delta l$). Flödes hastigheten för vattenvolymen eller darcyflödet, q (m/s) är ingen reell hastighet eftersom vattnet endast kan passera de delar av arean som innehåller hålrum. Vattnets genomsnittliga hastighet, v i akviferen erhålls genom att dividera darcyflödet, q med den effektiva porositeten. Denna ekvation utgör grunden för diffusionsekvationen i MODFLOW, se Harbaugh (2005). Baserat på den konceptuella modellen definieras en numerisk grundvattenmodell med ett tredimensionellt rutnät där en ruta representerar ett material. Antalet rutor i varje led, x , y och z måste vara anpassat mot modellens mål. Ett finare rutnät möjliggör en mer detaljerad modellering av hur grundvattnets gradient förändras på korta avstånd men innebär att modellen kräver större datorkapacitet. I modellen för Varberg har varje ruta blivit tilldelat ett material från jordlager- och bergnivåmodellen. Eftersom denna modell har förutsatt kontinuerliga lager över hela området har tunna lager, av t.ex. lera, skapats även där lera inte kan antas förekomma. Mot bakgrund av detta har jordlager tunnare än 0,3 meter tagits bort från den numeriska modellen. Det

kristallina berget har i sin tur delats upp i tre delar: en två meter mäktig övre del med uppsprucket ytberg, framträdande sprickzoner samt övrigt berg. Dessa material kan sedan parametreras från tidigare steg. Eftersom en betydande heterogenitet kan förekomma inom respektive material parametreras modellen genom så kallade "pilot-points" (PP) (Doherty, 2003) där parametervärdena för hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning tillåts variera mellan de olika punkterna. Till sist definieras randvillkor baserat på den konceptuella modellen.

När den numeriska modellen har definierats kan den kalibreras mot uppsatta kalibreringsmål. Denna process innebär ofta en iterativ ändring av samtliga ingående faktorer i den numeriska modellen till dess att kalibreringsmålet har nåtts. I modellen för Varberg har modellen först kalibrerats genom manuella ändringar. När endast mindre avvikelser kvarstår kan en automatisk kalibrering genomföras med PEST (Doherty & Hunt, 2010) som är ett mjukvarupaket baserat på regulariserad inversion. Regulariseringen innebär att ytterligare information introduceras som beskriver sambandet mellan modellens parametrar för att matematisk kunna lösa problem med flera unika lösningar. Inversionen innebär att observationer (t.ex. grundvattennivåer) används för att begränsa variansen i modellens parametrar. I detta steg är det också viktigt att utvärdera modellens rimlighet gällande vattenbalans, modellerade nivåer där observationer saknas samt skattade parametervärden.

I nästa steg skapas en probabilistisk modell där parametervärdena för hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning tillåts variera både mellan varje PP och mellan varje simulering. Den inversa probabilistiska simuleringen baseras på den tidigare kalibrerade modellen som stämmer väl överens med tillgängliga observationer. Sedan simuleras avvikelser från dessa baserat på prior antaganden om variabiliteten för en viss parameter. Dessa priorantaganden har ansatts genom att definiera övre- och undre nivåer utifrån vad som är rimligt för respektive material. Inom dessa intervall simuleras sedan parametervärden för varje PP. Om simuleringen resulterar i att modellen inte längre är kalibrerad simuleras ett nytt värde i PEST till dess att en kalibrerad lösning erhålls. Den inversa probabilistiska modelleringen innebär att det inte kommer att vara någon större skillnad i simulerade grundvattennivåer mellan de olika simuleringarna inom områden med grundvattennivåobservationer som modellen kalibreras mot, däremot kommer det att finnas en skillnad i områden där observationer saknas. Huvudsaken i denna modellering är dock att hitta flera möjliga kombinationer av parameteruppsättningar som svarar mot uppsatta kalibreringsmål. Genom dessa kombinationer erhålls posterioriestimat för varje PP, se Figur 2.



Figur 2 Princip för konceptuell modell, numerisk modell med grid-lager och invers probabilistisk kalibrering med PEST.

I nästa steg utvärderas de probabilistiska modellerna. Rimligheten kontrolleras på samma sätt som för den enskilt kalibrerade modellen. Utöver detta kan det förekomma att PEST inte lyckades kalibrera vissa lösningar tillräckligt väl (se avsnitt 0

Kalibreringsmål) eller att det förekommer en diskrepans i vattenbalansen mellan in och utflöde.

Från de kalibrerade lösningarna kan effekten av en förändrad vattenbalans genom olika åtgärdsalternativ modelleras. Dessa åtgärdsalternativ innefattar olika design av bergtunnel och tråg samt tätning av dessa. Även om de kalibrerade lösningarna är snarlika gällande grundvattennivå innebär skillnaden i parametervärden att de olika kalibrerade simuleringarna svarar på olika sätt mot samma åtgärdsalternativ. Detta innebär att det i modelleringen för varje åtgärdsalternativ kommer att finnas avvikelser i grundvattensänkningens storlek på olika platser, skillnader i vattenbalans och i läckagets storlek till tunneln och tråget.

Baserat på de skillnader som framkommer mellan de olika åtgärdsalternativen kan de utvärderas mot sannolikheten för oönskade förhållanden. I projektets nästa steg kommer risken för marksättningar att utvärderas baserat på de modellerade grundvattensänkningarna. Andra risker innefattar t.ex. hur förändrade flödesmönster påverkar transport av markföroreningar.

Från denna utvärdering kan antingen ett alternativ väljas som sedan genomförs, att mer information samlas in för att minska osäkerheterna i modellen eller att andra möjliga åtgärdsalternativ testas i modellen.

3 TILLGÄNGLIG INFORMATION

Underlaget som redovisas av Tabell 1 har använts för att bygga upp modellen.

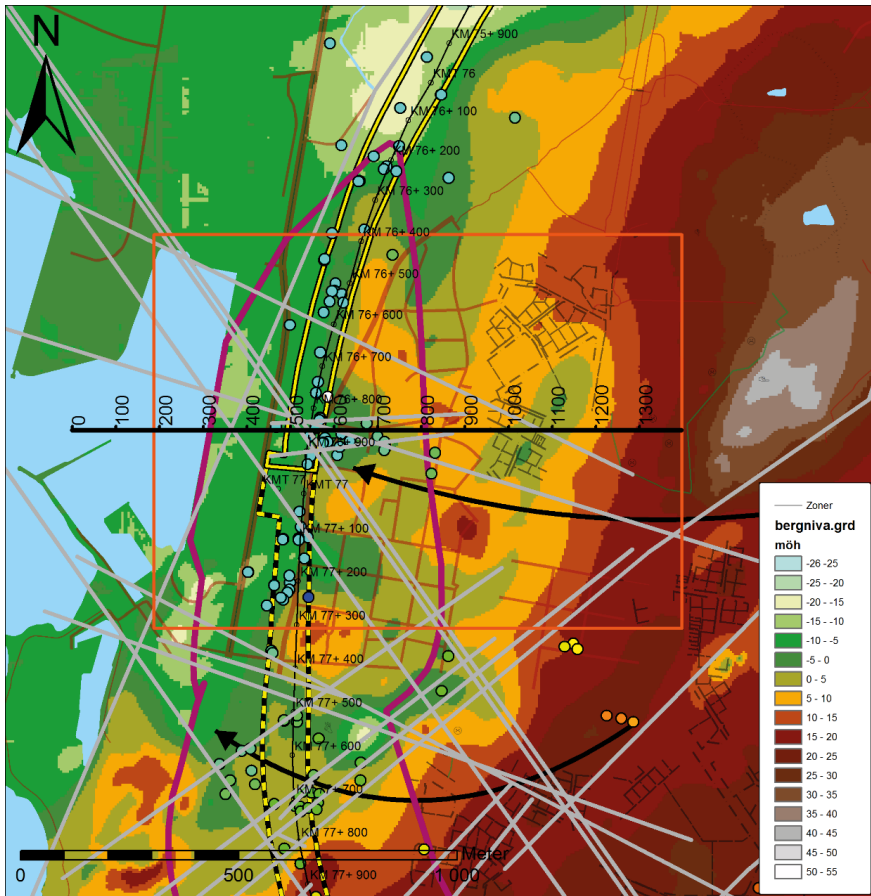
Tabell 1 Underlag för modellen.

Modell jordlager- och bergnivå	Tidigare upprättad modell för detta (Sundell et al., 2017).
Läge för framträdande sprickzoner	GIS-fil levererad från Trafikverket 2017-07-15. SGU:s strukturgeologiska karta.
Hydrogeologiska egenskaper	Redovisning av hydrauliska tester i PM Hydrauliska Tester (Martinsson et al., 2016), tolkningar i PM Hydrogeologi Sundlöf et al. (2016) samt generella kunskaper om egenskaper för respektive material, se t.ex. (Gustafson, 2012).
Grundvattennivåer	Grundvattennivåobservationer från Varbergstunnelprojektet (levererat i en Geosuitedatabas) samt observationer från inventering av Varbergs kommuns arkiv. Medelnivåer har använts. Generellt är antalet observationstillfällen i enskilda grundvattenrör få.
Klimat	Beskrivning i PM Hydrogeologi Sundlöf et al. (2016).
Ytavrinning	Markytemodell, GIS-fil samt beskrivning i PM Hydrogeologi Sundlöf et al. (2016).

4 KONCEPTUELL MODELL

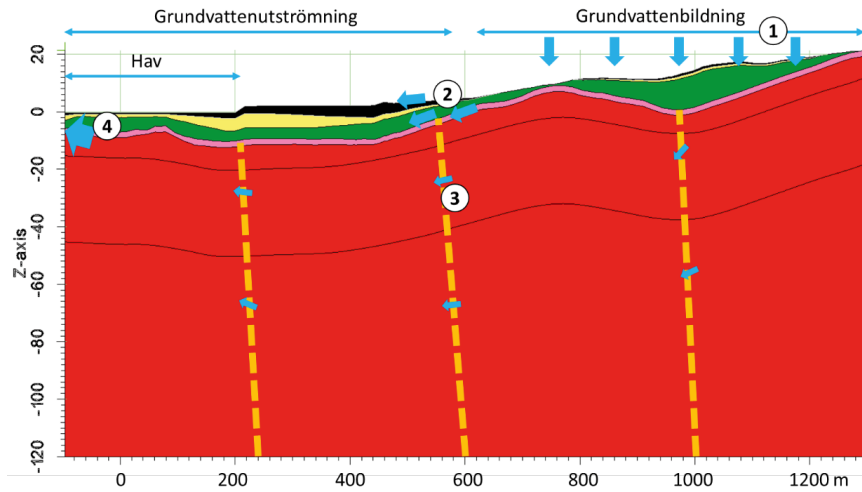
Modellen täcker det område som redovisas av Figur 3. I flera inledande försök testades större modellområden. Området fick dock successivt minskas för att lyckas genomföra den inversa probabilistiska modelleringen i PEST som kräver mycket datorkapacitet. Det valda området är dock tillräckligt stort för att modellera hur grundvattnet i jord påverkas eftersom jordtäcket är mycket tunt i de östra delarna och den västra delen sträcker sig en bit ut i havet vilket på tillräckligt stort avstånd utgör en rand med konstanta nivåer.

Markytan lutar generellt från höjdområdet i öster mot havet i väster. Längst i öster går berget i dagen vilket det även gör ställvis på ett antal platser i områdets centrala delar, se Sundell et al. (2017). Som beskrivet i PM Hydrogeologi (Sundlöf et al., 2016) förutsätts att bergets övre delar är uppsprucket och mer vattenförande än övrigt berg. Berget består av en gnejsig granit som övergår till en charnockit. Framträdande sprickzoner har tolkats till de platser som redovisas av Figur 3. För de fall där GIS-materialet endast redovisar en avgränsad utbredning av sprickzoner inom den planerade järnvägskorridoren har dessa extrapolerats till sänkor i bergytmodellen. Siltig lera förekommer främst i den västra delen av området, se Figur 18 i redovisningen av modellen för jordlager- och bergnivå (Sundell et al., 2017). Grovkorning jord förekommer både direkt på berget och över leran där den förekommer. Denna jord består av sandig morän, svallad sand samt fyllnadsmaterial.



Figur 3 Modellområde (orange ruta) tillsammans med bergnivåmodell, markering för profil i Figur 4 (streck med längdmarkering), observationspunkter för grundvattennivåer (färgmarkerade punkter där färgen representerar en grundvattennivå), pilar för storskalig grundvattenströmning (svarta pilar), framträdande sprickzoner (gråa streck) samt påverkansområde från PM Hydrogeologi (lila linje) (Sundlöf et al., 2016). Påverkansområdet från PM hydrogeologi har modifierats i senare handlingar.

Grundvattnets strömning följer i huvudsak topografin från höjdområdet i öster till havet i väster. Inom området för den planerade järnvägen är grundvattennivåerna generellt omkring +1 m över havet. Mellan detta område och havet är grundvattengradienten väldigt flack. Grundvattenbildning antas ske i modellens östra område där lera saknas, se Figur 4 (1). Huvuddelen av grundvattnet strömmar sedan i den grova jorden och det uppspruckna ytberget (2) vidare ut mot havet (4) eller till dränering i de lägre liggande områdena. En mindre del av grundvattnet strömmar i bergets sprickor (3) innan det senare når havet (4).



Figur 4 Profil för markering i Figur 3 som beskriver grundvattensystemet konceptuellt. Svart = Grovt jordmaterial, gult = lera, grönt = grovt jordmaterial, rosa = uppsprucket ytberg, streckade orangea linjer = framträdande sprickzoner, rött = övrigt berg. Notera att det är olika skalor mellan höjd- och längdaxel. Se text ovan för förklaring av siffror 1-4.

5 MATERIALEGENSKAPER OCH GRUNDVATTENBILDNING

Prior-antaganden som min- och maxvärden för respektive materials hydrauliska konduktivitet samt grundvattenbildning framgår av Tabell 2. Eftersom PP använts i modellen kan egenskaperna variera mellan olika platser inom samma material. Ett stort intervall för hydraulisk konduktivitet har antagits för den övre grova jorden då det inte kan uteslutas att den på vissa platser består av mera finkornigt material. De hydrogeologiska undersökningarna som genomförts i projektet har främst varit inriktade mot den undre grova jorden, det uppspruckna ytberget och bergets sprickzoner. Från resultaten av dessa undersökningar har intervallet för priorantaganden ansatts något bredare än de värden som framkommit från undersökningar.

Både PM Hydrogeologi (Sundlöf et al., 2016) och PM Hydrauliska Tester (Martinsson et al., 2016) beskriver att undersökningarna, även på korta avstånd från varandra, visar på stor spridning i utvärderade parametervärden. Undantaget inom modellområdet är för längdsträckning 76/830 vid pumpbrunn 14T3085U där ett pumptest för övergångszonen mellan jord och berg är utvärderat till en transmissivitet mellan $5e-5$ och $1e-4$ m²/sek och där slugtest visar värden i motsvarande storleksordning. För det övriga berget har inte PP använts. Istället tilläts modellen kalibreras till ett värde inom det angivna intervallet som används för hela materialet.

Enligt PM Hydrogeologi är nettonederbörden i Varberg omkring 350 mm per år ($1,1e-8$ m/sek) och grundvattenbildningen kan antas variera mellan 35 och 175 mm per år ($1,1 - 5,5 e-9$ m/sek). För modellen har ett betydligt större intervall antagits för enskilda punkter, se Tabell 2. Den lägre nivån motiveras av att det är möjligt att någon grundvattenbildning inte alls förekommer på vissa platser. Den övre nivån, som är betydligt högre än nettonederbörden motiveras av att en ytavrinning till en viss plats kan skapa en lokalt större grundvattenbildning tillsammans med att läckande ledningar kan förekomma som lokalt skapar en större grundvattenbildning.

Tabell 2 Prior-antaganden för ingående parametervärden för hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning i m/s.

<i>Index</i>	<i>Material</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
HK_11	Övre grov jord	1e-10	0,02
HK_12	Lera	5e-11	5e-7
HK_13	Undre grov jord	4e-7	0,02
HK_14	Uppsprucket ytberg	5e-8	5e-5
HK_15	Övrigt berg	1e-10	1e-8
HK_16	Sprickzoner	5e-10	1e-4
RCH_101	Grundvattenbildning	9e-13	6e-08

6 KALIBRERINGSMÅL

Totalt har 38 grundvattennivåobservationer valts för att kalibrera modellen, se Tabell 3 samt Figur 6. Inom området finns fler observationspunkter än de redovisade men eftersom många ligger nära varandra med grundvattennivåer på samma nivå, har urvalet begränsats till de redovisade. Varje observationspunkt har blivit tilldelat ett lager 1-5 där lager 1-3 är i jord, 4 är det uppspruckna ytberget och lager 5-7 är övrigt berg med sprickzoner uppdelade i tre lager, se Figur 4. Lagertilldelningen baseras på en jämförelse mellan grundvattenrörets spetsnivå och modellen för jordlager och bergnivåer samt tidigare beskrivning om bedömt magasin.

Som beskrivet tidigare saknas längre observationsserier med undantag för ett fåtal grundvattenrör. Baserat på dessa bedöms grundvattennivåerna över tid variera med omkring en meter inom området, se figur 9-2 och 9-3 i PM Hydrogeologi (Sundlöf et al., 2016). Kalibreringsmålet har därför valts till att de modellerade grundvattennivåerna inte ska avvika mer än en meter från de observerade. Detta innebär att simuleringar med större avvikelser än en meter i någon observationspunkt sorteras bort i den senare inversa probabilistiska modelleringen. Som kalibreringsmål har också valts att skillnaden i modellerat in- och utflöde inte får vara större än 10 procent.

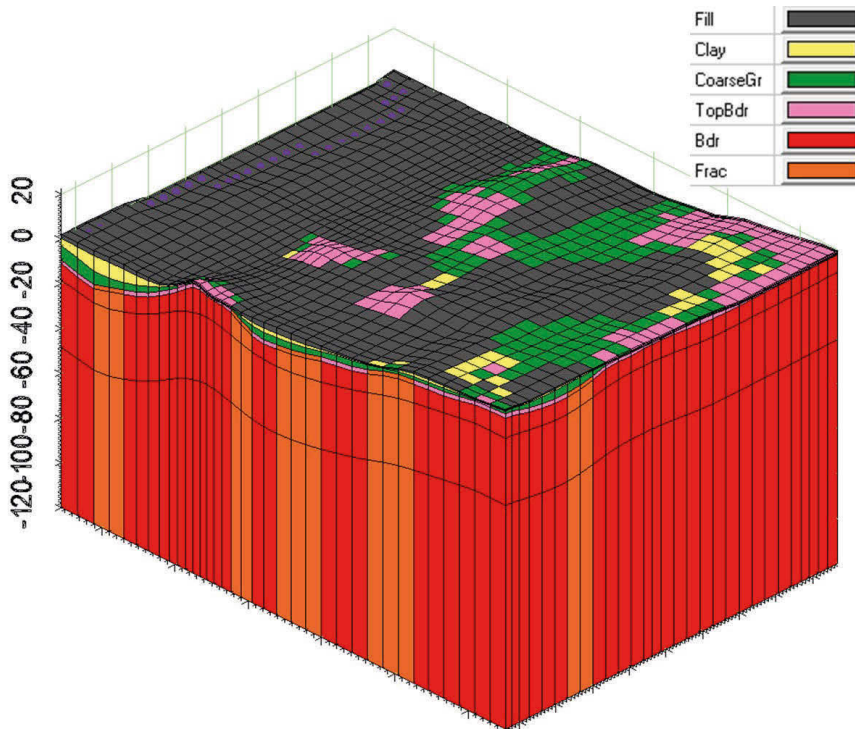
Tabell 3 Grundvattennivåobservationspunkter som valts för att kalibrera modellen.

<i>Namn</i>	<i>Lager</i>	<i>Grundvattennivå (meter över havet)</i>
str-10-15-2	1	1,64
14T3048U	3	1,15
14T3073U	3	1,1
14T3090U	3	0,905
14T3100U	3	1,465
14T327RU	3	4,42
14T344RO	3	0,82
14T409RU	3	0,8
14T419RU	3	0,046
14T420RU	3	1,474
14T428RU	3	0,539
GW276003	3	0,7
GW276006	3	1,435
GW277002	3	0,6
renen 19	3	3,51
renen 3	3	1,34
str-10-01	3	5,88
str-10-02	3	5,42

<i>Namn</i>	<i>Lager</i>	<i>Grundvattennivå (meter över havet)</i>
str-10-09	3	2,12
str-10-10	3	1,68
str-10-13-2	3	1,51
x4	3	1,09
14T3051O	4	0,76
14T3056U	4	1,065
14T3065U	4	0,78
14T3091U	4	1,305
14T3092U	4	1,415
14T348RU	4	0,58
14T4003U	4	0,87
14T4008U	4	0,865
14T4012U	4	0,91
14T4022U	4	0,95
14T4029U	4	0,64
14T4031U	4	0,625
14T3104U	5	1,53
14T4030X	5	0,57
GW276002	5	0,69
GW277001	5	0,675

7 NUMERISK MODELL

Geometri för den numeriska modellen redovisas av Figur 5. Modellen är uppbyggd i sju lager där varje cell är ca 30x30 m i y- och x-led. En högre upplösning har valts kring området närmast tunneln för att kunna modellera de förändrade grundvattennivåerna till följd av denna med större noggrannhet. Antalet lager har valts med hänsyn till geologiska förhållanden samt placering för tunnel och schakt. I den södra delen där bergtunneln kommer att placeras har lagerindelningen anpassats så att tunneln placeras i lager 6 med övrigt berg både över och under tunneln.



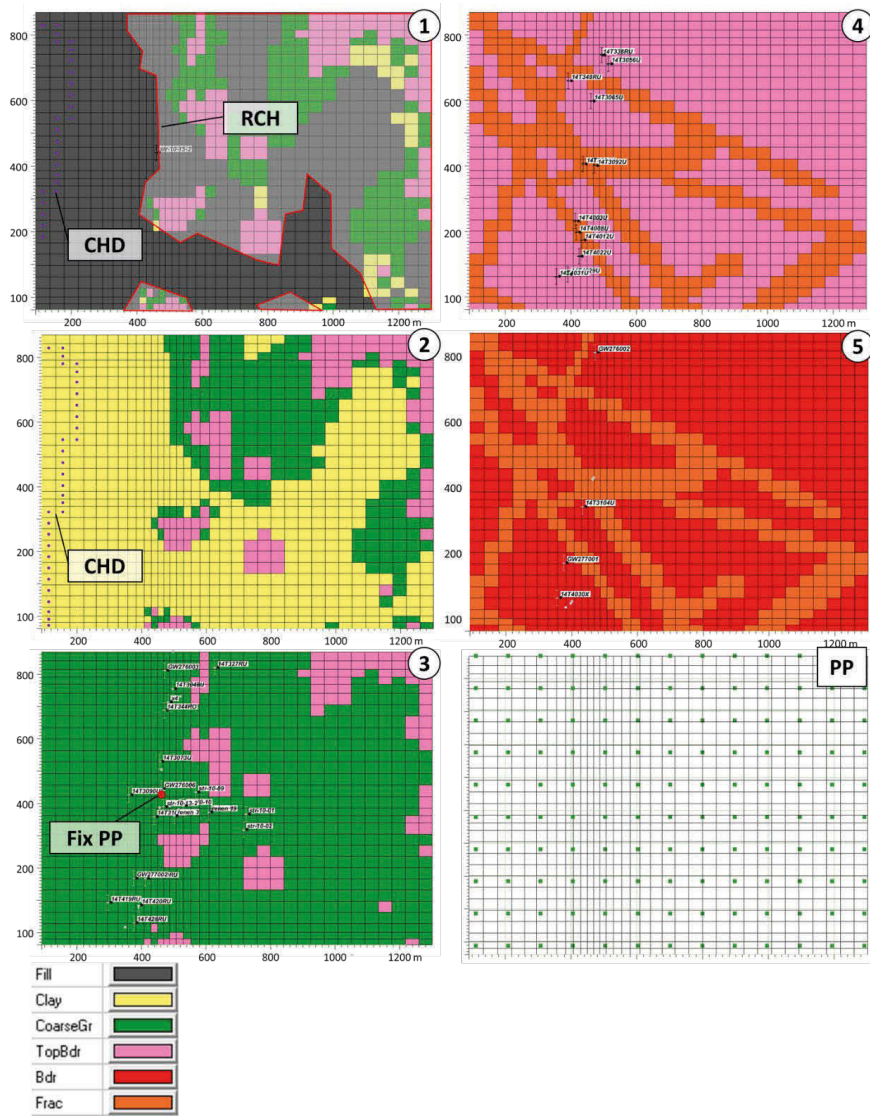
Figur 5 Modellgeometri med vy från sydost.

Lagerindelningen med material i varje lager redovisas också av Figur 6. I det översta lagret (1) förekommer samtliga jordmaterial. I de områden där berget går i dagen är materialet krossat ytberg. Område med grundvattenbildning (RCH) har antagits till skuggat område inom röd linje. Detta område har valts eftersom någon betydande grundvattenbildning inte kan förutsättas, dels eftersom grundvattengradienterna närmast havet är flacka vilket indikerar en grundvattenutströmning, dels eftersom lertäcket har en betydande tjocklek och utbredning. I den västra delen av området har en konstant nivå (CHD) för havet (+0,03 m) antagits i lilamarkerade punkter. Motsvarande

konstanta nivå har också antagits i de punkter som är markerade (CHD – lila punkter) i lager 2. Lager 2 består av lera, grovkornig jord och ytnära berg, se Figur 6 (2).

Lager 3 består av grovkornig jord och uppsprucket ytberg. Någon konstant nivå har inte antagits för havet i den västra delen eftersom leran utgör en barriär mellan havet och grundvattnet i lager 3. Flera olika antaganden om randvillkor för havet har testats men detta visade mest rimliga resultat. Den hydrauliska konduktiviteten (K) i samtliga material förutom övrigt berg representeras av PP spridda på ett avstånd om 100 m inom de områden där respektive material förekommer (se "PP" i Figur 6). Även grundvattenbildningen representeras av PP på dessa avstånd. För den grova jorden antas en konstant PP som inte tillåts variera i läget för pumptestet i 14T3085U (se markering för "Fix PP" i Figur 6). Även om utvärderingen av pumptestet anger ett intervall har ett konstant värde till $T = 8e-5 \text{ m}^2/\text{s}$ antagits då kringliggande punkter för den grova jorden tillåts variera tillsammans med det uppspruckna ytberget. Från modellens lagertjocklek på 4,2 meter i platsen för den fixerade PP har ett konstant K på $2e-5 \text{ m/s}$ ansatts.

Lager 4 består av uppsprucket ytberg samt framträdande sprickor, se Figur 6 (4). Sprickigheten på ytberget avtar mot djupet vilket också medför ett lägre K. Några observationer av ytbergets utbredning inom hela modellområdet förekommer inte på samma sätt som för jordlagerindelningen. Istället har Lager 4 antagits till att vara två meter mäktigt. Om berget skulle vara mer eller mindre uppsprucket på vissa platser och därigenom medföra ett förändrat K kan detta representeras genom olika värden på de PP som representerar K. Lager 5-7 består av framträdande sprickor och övrigt berg, se Figur 6 (5).

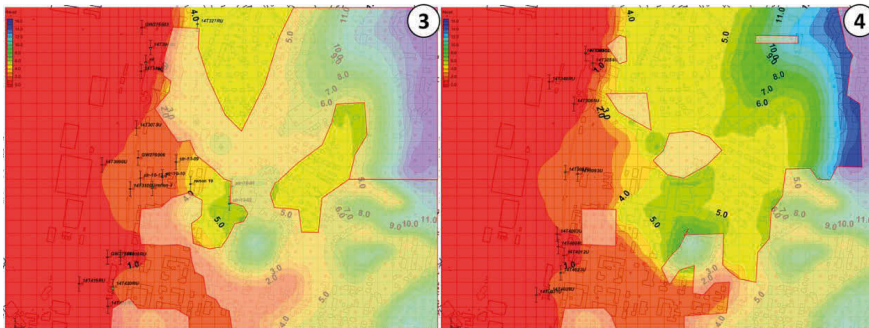


Figur 6 Lager 1-5 (lager 6-7 har samma material som lager 5) tillsammans med observationspunkter för respektive lager (se Tabell 3), randvillkor (beskrivna i text ovan) och läge för PP. X-axeln har samma längdangivelse som Figur 4.

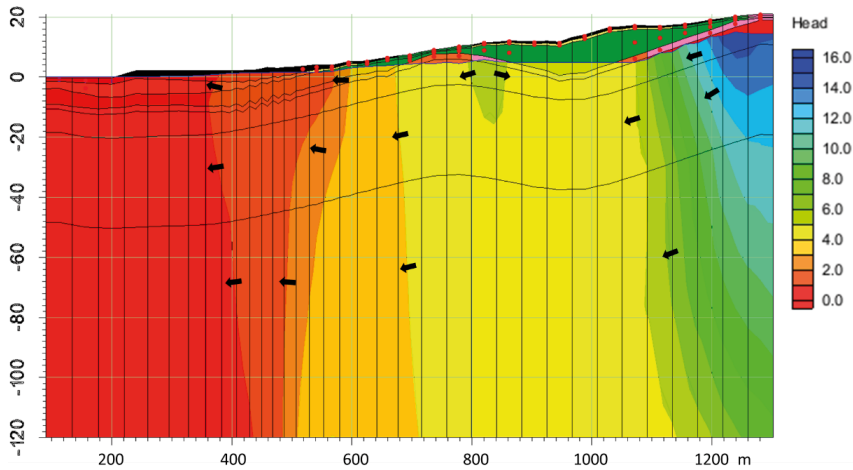
8 KALIBRERAD MODELL

Som beskrivits tidigare har modellkalibreringen och tidigare steg varit en iterativ process med kontinuerliga uppdateringar av den numeriska modellen. Exempel på sådana uppdateringar har varit förändrade modellområden, gridstorlek och spridning av PP. Initialt testades manuella kalibreringar där parametervärdena i Tabell 2 successivt ändrades till dess att modellerade grundvattennivåer är nära de observerade. Baserat på denna kalibrering initierades en invers kalibrering med PEST. Resultatet i form av modellerade grundvattennivåer och fält för K från PEST-kalibreringen redovisas av Figur 7, Figur 8 och Figur 9. Medianskillnaden mellan de 38 observerade grundvattennivåerna och den kalibrerade grundvattennivån är 7 cm och den största skillnaden uppgår till 44 cm. Vattenbalansen (hur mycket grundvatten som kommer till och försvinner från modellen under ett år) och grundvattenbildningen för hela området uppgår till 22 mm/år per m². Grundvattenbildningen utslaget över det antagna området för grundvattenbildning (se Figur 6 bild 1) uppgår till 37 mm per år per m². Jämfört med tidigare antagna nivåer för grundvattenbildning är den modellerade i den lägre delen av intervallet. Anledningar som kan rättfärdiga den låga grundvattenbildningen är att området till stor del ligger inom ett utströmningsområde samt att i princip hela området är bebyggt med stor andel ytnära dränering och hårdgjorda ytor.

I Figur 7 redovisas modellerade grundvattennivåer i lager 3 och 4 tillsammans med områden för torra celler i respektive lager. Övriga lager visar på ett liknande strömningsmönster. Strömningsmönstret följer i stort konturerna för bergöverytans nivå. Detta eftersom ovanliggande lager generellt sett har en högre hydraulisk konduktivitet än berget. Detta ses tydligt i den högra delen (>1100 m) i Figur 8 där grundvattenytan ligger nära bergets överkant. En stor del av cellerna i lager 3 och även i lager 4 är enligt modellresultatet torra (ej vattenmättade). Andelen torra celler är större i lager 1 och 2 och mindre i lager 5. I lager 6 och 7 saknas torra celler. Den vidare inversa probabilistiska modelleringen kommer att visa på hur omfattningen av torra celler kan variera vilket är viktig indata till sättningsmodelleringen i nästkommande steg.

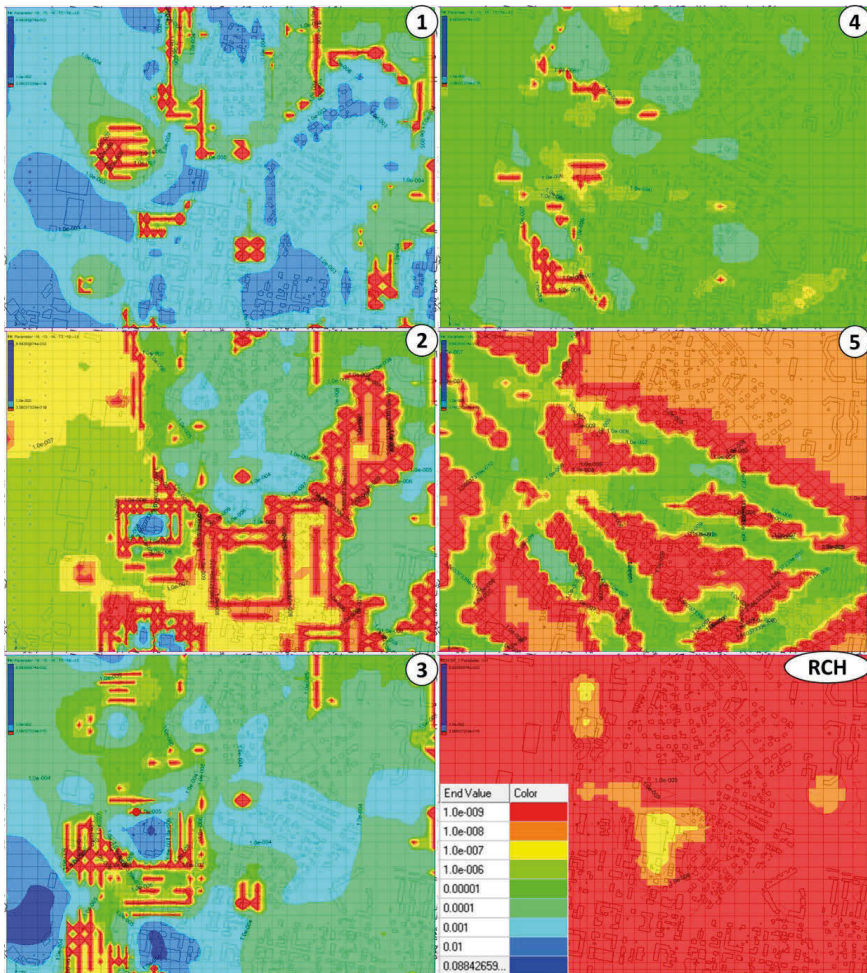


Figur 7 Modellerade grundvattennivåer i lager 3 och 4 från en kalibrerad modell tillsammans med platser med grundvattennivåobservationer för respektive lager. De skuggade visar områden med torra (ej mättade) celler för respektive lager.



Figur 8 Tvärsektion i samma läge som Figur 4 med modellerade grundvattennivåer och flödesriktningspilar.

Kalibrerade parametervärden för respektive lager framgår av Figur 9. Fälten för respektive lager har tagits fram genom interpolation mellan PP för respektive material. Interpolationen har genomförts med Kriging (Matheron, 1963) där variogram har tagits fram för respektive grupp PP. Kraftiga förändringar förekommer inom de olika lagren där angränsande celler består av olika material. Läget för den fixerade PP är markerat på samma plats i lager 3 som i Figur 6. Som framgår av figuren uppvisar varje lager en kraftig heterogenitet. Att heterogeniteten kan vara stor har också tidigare undersökningar visat. Vidare invers probabilistisk modellering kommer att visa hur mycket heterogeniteten kan variera för respektive material.

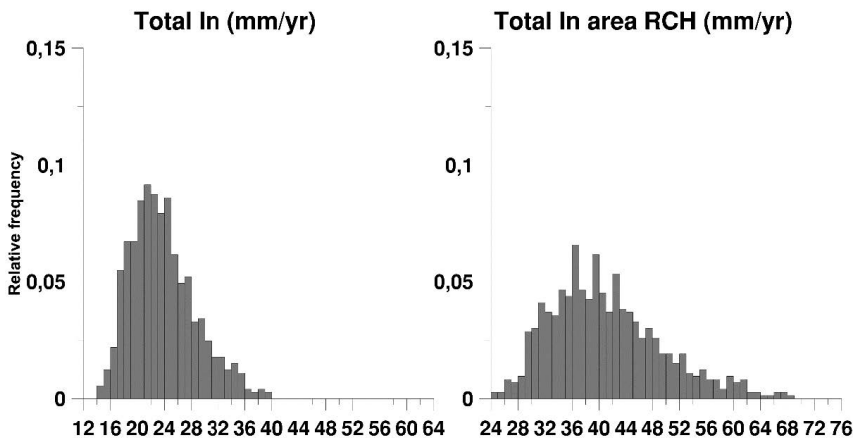


Figur 9 Modellerade fält för K i respektive lager 1-5 (5 representerar även lager 6 och 7), grundvattenbildning (RCH) och legend (för både K och RCH) med maxnivå för respektive intervall i m/s.

9 INVERS PROBABILISTISK KALIBRERING

Den inversa probabilistiska modellen baseras på kalibrerade medelvärden och variogram för respektive materials PP samt tillåtna max- och minvärden (Tabell 2). Variogrammen beskriver hur mycket variansen ökar på avstånd från en PP. För varje simuleringsomgång och i varje PP slumpas ett värde inom det tillåtna intervallet enligt Tabell 2. Sedan upprepas motsvarande process som har beskrivits ovan för den kalibrerade modellen, dvs. att PEST ändrar värdena successivt till dess att skillnaden mellan observerade och simulerade nivåer uppfyller kalibreringskravet. Denna process har upprepats för 1000 simuleringsomgångar. I vissa fall lyckas inte PEST reducera skillnaderna mellan observerade och kalibrerade nivåer tillräckligt väl. Såsom har beskrivits i metodiken har lösningar med större skillnader än 1 m mellan observerade och modellerade grundvattennivåer tagits bort tillsammans med lösningar med en större skillnad än 10 procent i vattenbalans mellan in och utflöde. Totalt resulterade detta i 731 accepterade kalibrerade modeller.

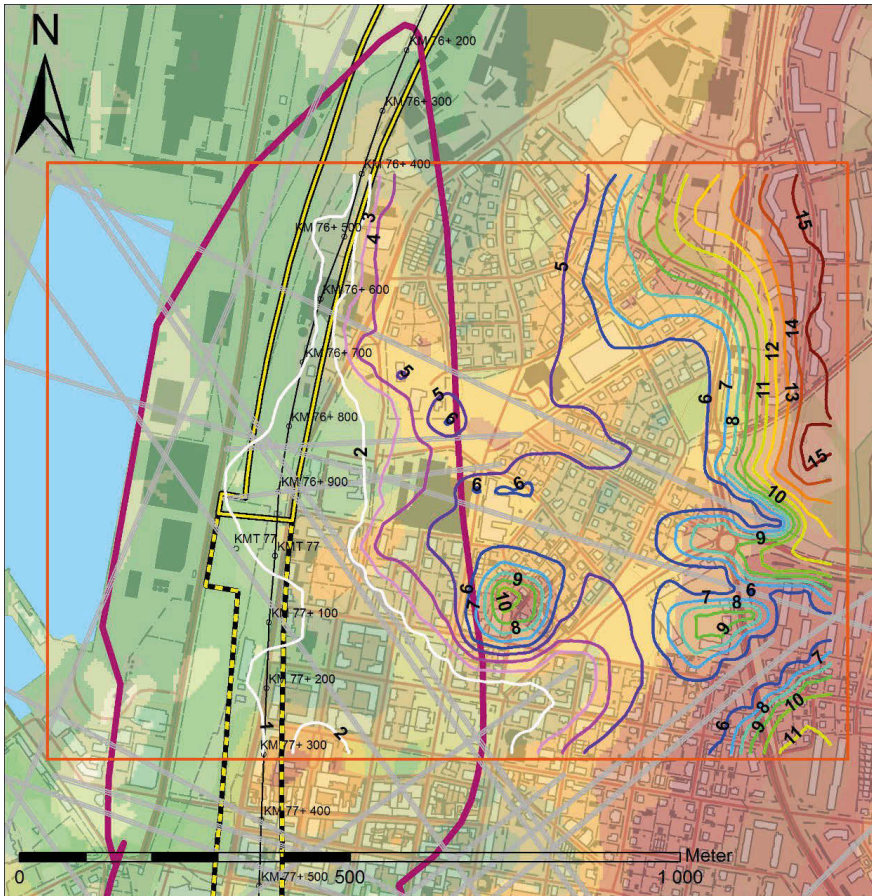
Vattenbalansen för de accepterade kalibreringarna framgår av histogram i Figur 10 beräknade i mm/år per m². I den vänstra bilden är vattenbalansen utslagen över hela modellområdet och i den högra är den utslagen endast inom området för grundvattenbildningen. Medianan är 23 respektive 40 mm per år vilket är i samma storleksordning som för den kalibrerade modellen. Sett över området för grundvattenbildning visar modelleringen att grundvattenbildning inom intervallet 24-68 mm/år kan kalibrera modellen väl.



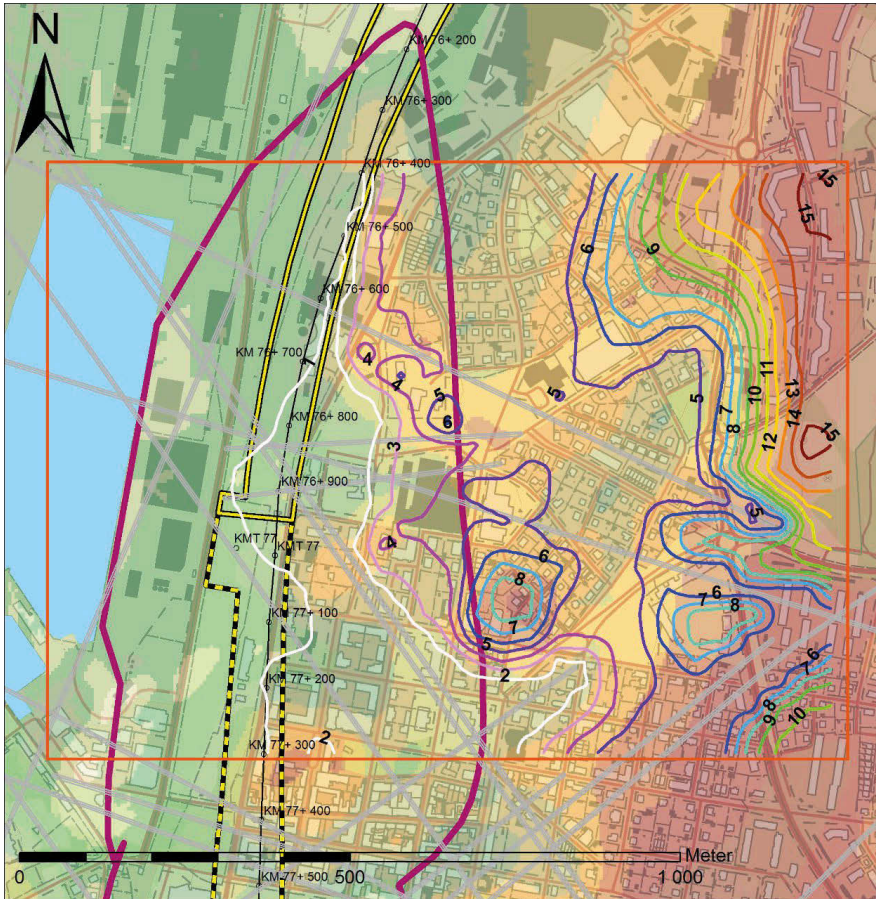
Figur 10 Histogram för in- och utflöde (grundvattenbildning respektive konstant rand vid havet) för hela området (vänster) samt inom området för grundvattenbildning (höger) för de accepterade modellerna.

Figur 11, Figur 12 och Figur 13 redovisar median, 5:e percentilen samt 95:e percentilen i varje cell i lager 3 för grundvattennivåer från de accepterade modellerna. Att redovisningen gäller för varje cell innebär att det kan vara olika accepterade modeller

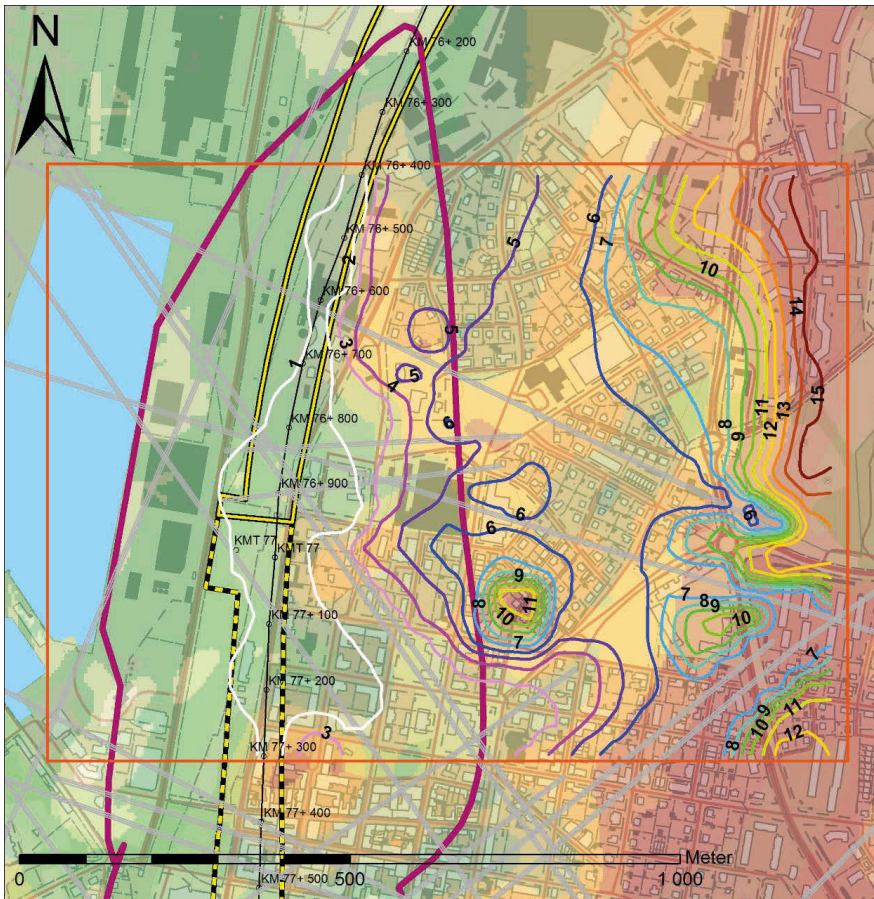
som ger upphov till t.ex. den högsta nivån i olika celler. Som framgår av figurerna följer grundvattennivåerna generellt bergytans kontur. De modellerade grundvattennivåerna påverkas också tydligt av sprickzoner i berggrunden. Figur 14 redovisar skillnaden mellan den 95:e och den 5:e percentilen. Närmast havet där en konstant rand har ansatts i lager 2 och 1 är skillnaden mycket liten. Inom områden med grundvattennivåobservationer uppgår skillnaden till omkring 0,5 m. De mest framträdande skillnaderna förekommer i höjdområden närmast sprickzoner där gradienten mot dessa är stor. I området i nordost är skillnaden liten då torra celler förekommer för de flesta simuleringarna i detta område.



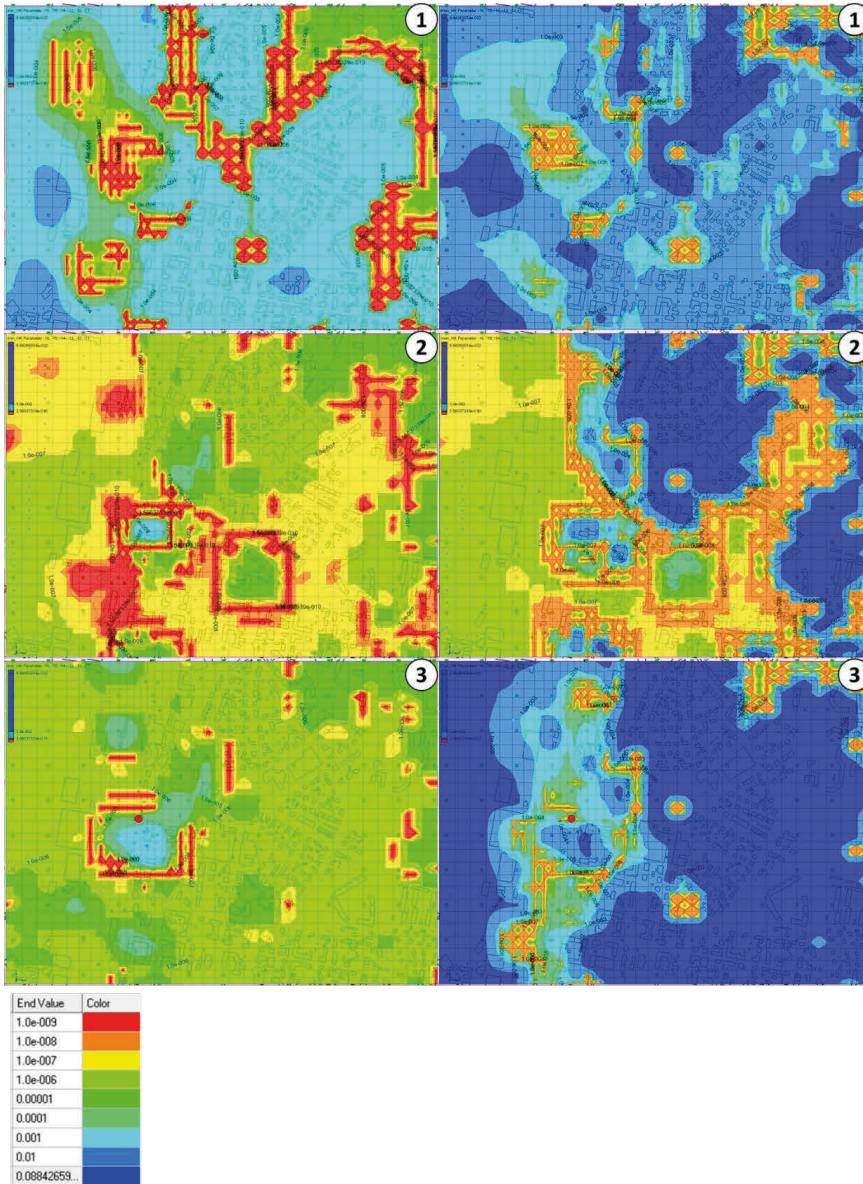
Figur 11 Medianvärden för grundvattennivåer i lager 3 för de 731 accepterade simuleringarna. Bergnivåmodellen och sprickzoner ligger i bakgrunden, se Figur 3.



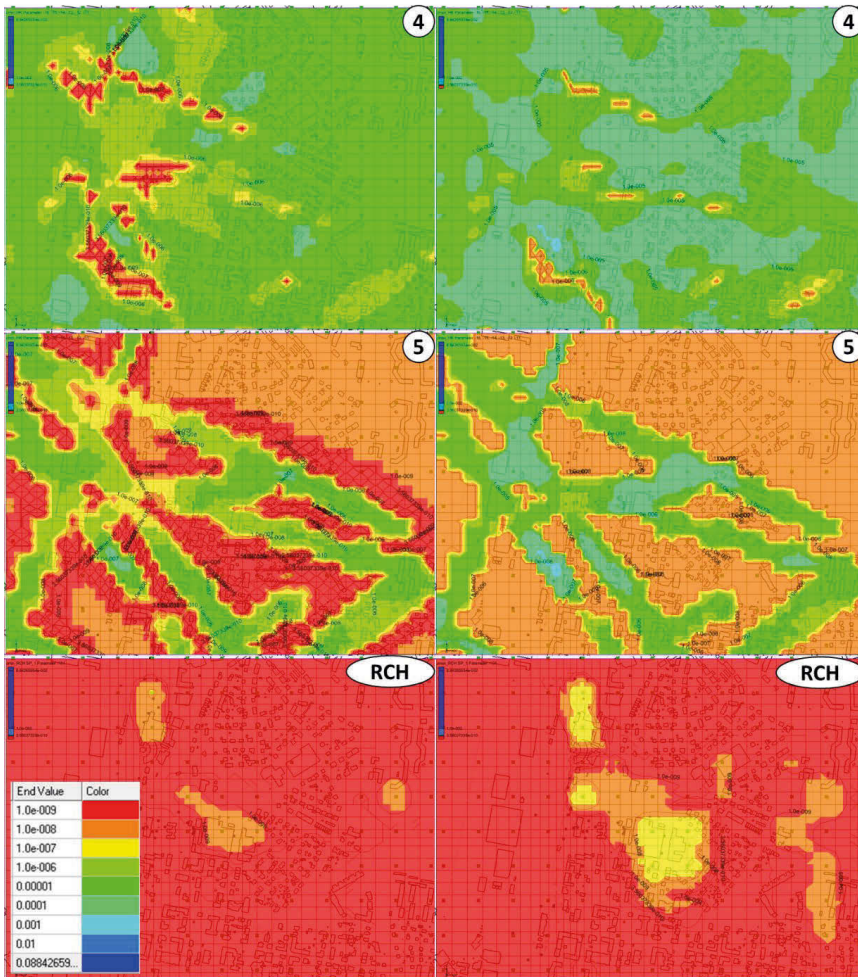
Figur 12 5:e percentilen för grundvattennivåer i lager 3 för de 731 accepterade simuleringarna.



Figur 13 95:e percentilen för grundvattennivåer i lager 3 för de 731 accepterade simuleringarna.



Figur 15 Min- (vänster) och maxvärden (höger) för K i lager 1-3 för de accepterade simuleringarna.



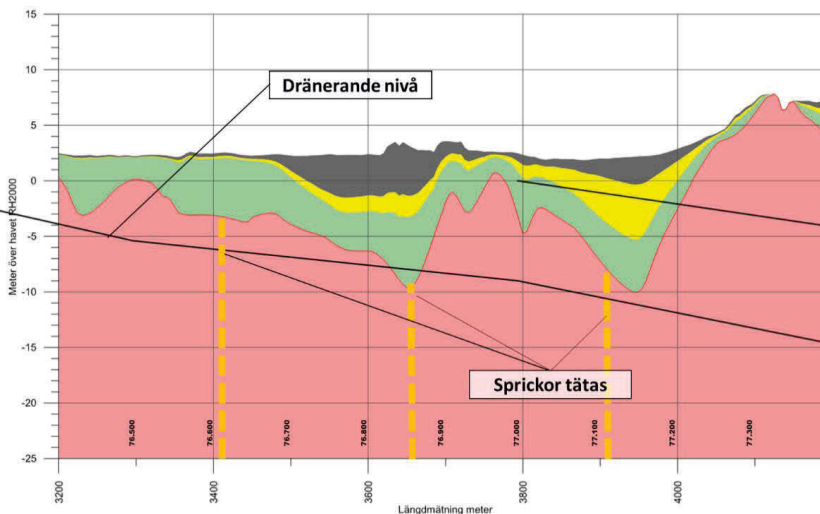
Figur 16 Min- (vänster) och maxvärden (höger) för K i lager 4-7 (nr. 5 representerar lager 5-7) samt för grundvattenbildningen (RCH) för de accepterade simuleringarna.

10 MODELLERING AV ALTERNATIV

Från de kalibrerade modellerna kan effekten av en störd vattenbalans i form av tunnel och schakt modelleras. Fem olika scenarier har undersökts (beteckning inom parantes är namn på modelleringsfil för att bibehålla spårbarhet):

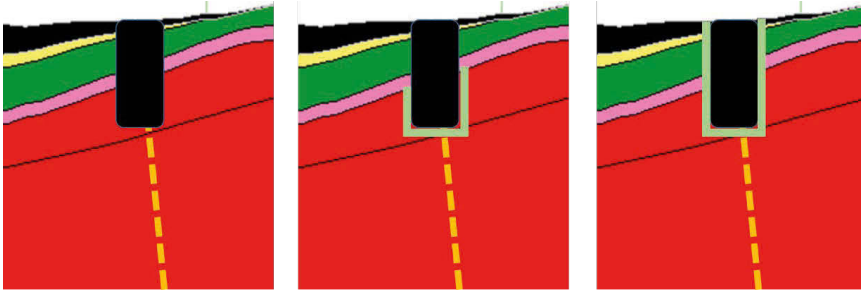
1. Helt utan tätning i schakt och tätning med högt K (1e-6) i sprickzoner (VF4i).
2. Tätning av schakt och sprickzoner till K = 1e-7 (VF4j).
3. Tätning av schakt och sprickzoner till K = 1e-8 (VF4k).
4. Tätning av schakt och sprickzoner till K = 1e-8 med ett mer vattengenomsläppligt skikt (K=1e-5) i lager 5 och 6 under och vid sidan om schaktet (VF4l).
5. Tätning av schakt och sprickzoner till K = 1e-8 med ett mer vattengenomsläppligt skikt (K=1e-5) i lager 1 till 6 under och vid sidan om schaktet (VF4m).

I samtliga alternativ utgör schaktens/tunnelns undre nivå dränerande nivå, se Figur 17. Sprickor har tätats i såväl schakt som tunnel i de lager där dräneringen är placerad, lagren däröver samt lagret därunder. Där schakten kommer att vara placerad har celler med material som representerar schakten placerats på samtliga nivåer ovanför dränerande nivå. Dessa har sedan tätats till angivna nivåer för K för respektive alternativ.



Figur 17 Profil utmed tunnelinjen.

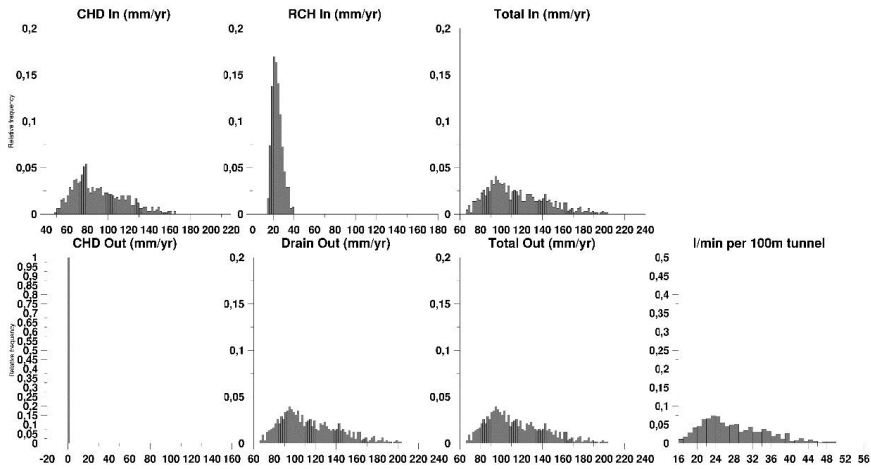
Den vänstra bilden i Figur 18 redovisar tätning av både schakt och framträdande sprickzoner (alternativ 1-3). Eftersom denna utformning kan utgöra en barriär för grundvattnet har två alternativ (4 och 5) utformats med ett dränerande skikt under och vid sidan om det tätade schaktet. Den mittersta bilden av Figur 18 redovisar alternativ 4 där det dränerande skiktet placeras under schaktet i lager 6 och på dess sidor i lager 5. Den högra bilden visar hur ett skikt lager placeras vid sidan om schaktet genom samtliga lager.



Figur 18 Alternativ för tätning och dränering av schakt.

10.1 Alt 1 (VF4i) – Helt utan tätning

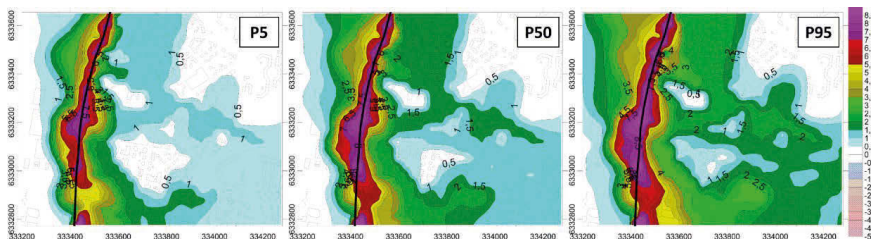
I det ursprungliga scenariot utan schakt och tunnel bestod flödet till modellen av grundvattenbildning beskrivet som PP över modellområdet. Flödet ut ur modellen bestod av dränering från den konstanta nivån som representerar havet i lager 1 och 2. För det första alternativet med tunnel utan tätning är inläckaget till tunneln så pass stort att den konstanta randen från havet istället utgör ett inflöde och dräneringen från tunneln helt utgör utflödet, se Figur 19. Inläckaget till tunneln/schaktet är beräknat till mellan 16 och 50 l/min och 100 m.



Figur 19 Histogram som beskriver vattenbalans för alternativ 1 i mm/år. Den övre raden visar flödet in i modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD) och från grundvattenbildningen (RCH) samt summan av dessa (Total In). Den undre raden visar flödet ut ur modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD), tunneln/schaktet (Drain Out) samt summan av dessa. Flödet från tunneln har också räknats om till l/min per 100 m tunnel i bilden längst till höger.

Modellerad påverkan från detta scenario för den 5:e, 50:e och 95:e percentilen för grundvattensänkning framgår av Figur 20. Som nämntes för den kalibrerade modellen gäller redovisade percentiler för varje cell. Det kan därför vara olika simuleringar i olika celler som ger upphov till en viss percentil. För samtliga percentiler visar modelleringen att grundvattensänkningens utbredning åt öster tydligt följer förekomsten av framträdande sprickor.

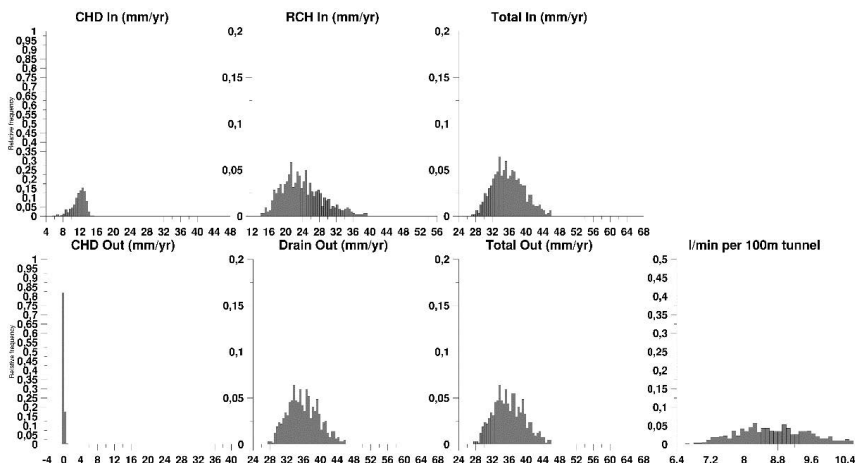
Detta scenario visar vad som kan hända om planerade tätningåtgärder inte genomförs. Även om sådana inte skulle genomföras under en begränsad tid under byggskedet kommer de i sådana fall påverka en begränsad del av sträckan. Den begränsade tidsaspekten innebär också att utbredningen inte kommer att bli lika omfattande som redovisat i Figur 20.



Figur 20 5:e , median och 95:e percentil för grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 1.

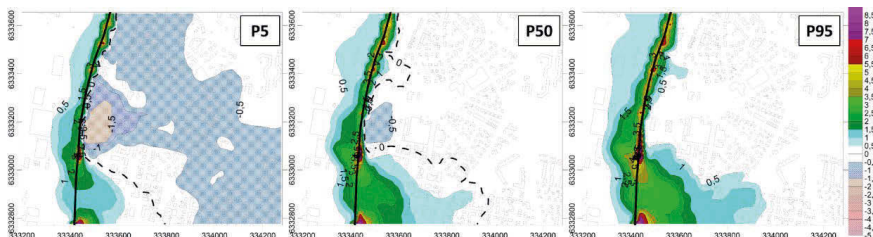
10.2 Alt 2 (VF4j) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-7$ m/s.

Alternativ 2 visar ett betydligt lägre flöde till tunneln jämfört med alternativ 1 till mellan 6,5 och 10,5 l/min per 100 m tunnel eller schakt, Figur 21. Även i detta alternativ står tunneln för i princip hela utflödet från modellen. Flödet från havet har dock minskat kraftigt.



Figur 21 Histogram som beskriver vattenbalans för alternativ 2 i mm/år. Den övre raden visar flödet in i modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD) och från grundvattenbildningen (RCH) samt summan av dessa (Total In). Den undre raden visar flödet ut ur modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD), tunneln/schaktet (Drain Out) samt summan av dessa. Flödet från tunneln har också räknats om till l/min per 100 m tunnel i bilden längst till höger.

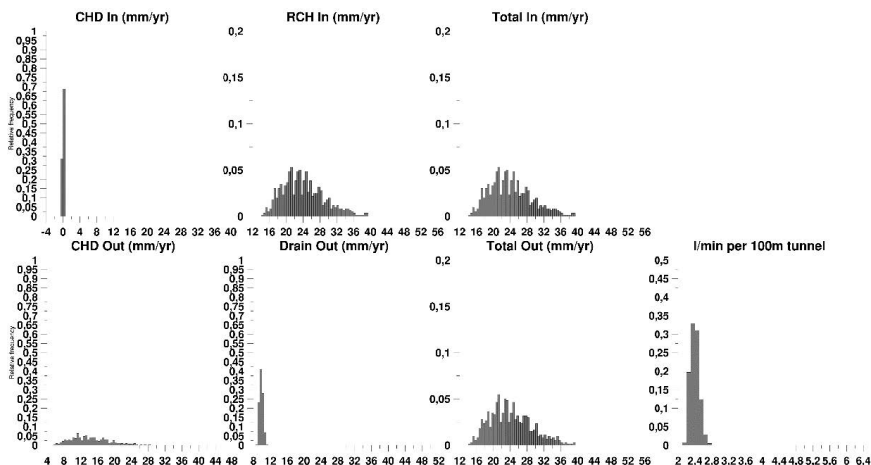
Grundvattenpåverkan i form av förändrade grundvattennivåer för alternativ 2 redovisas på samma sätt som för alternativ 1 i Figur 22. Förutom att grundvattensänkningen är betydligt mindre visar också modelleringens lägre percentiler att en höjning av grundvattennivåerna kan förekomma öster om tunneln (negativa värden) då tunneln med dess tätning utgör en barriär för grundvattenströmningen.



Figur 22 5:e , median och 95:e percentil för grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 2. Den streckade linjen visar gränsen mellan grundvattensänkning (positiva värden) och grundvattenhöjning (negativa värden).

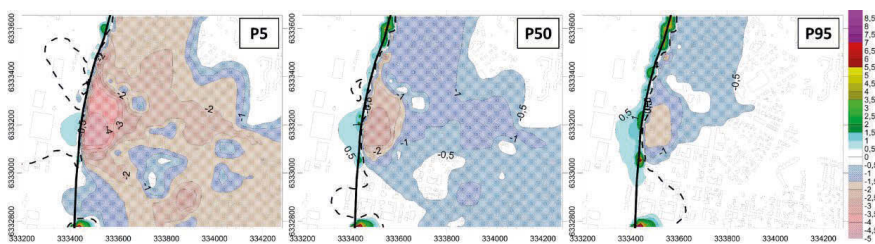
10.3 Alt 3 (VF4k) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s.

I detta scenario är flödet till schakt och tunnel mycket litet, mellan 2-3 l/min per 100 m. Till skillnad från de två första alternativen medför den konstanta nivån vid havet ett flöde ut ur modellen istället för ett tillflöde, se Figur 23.



Figur 23 Histogram som beskriver vattenbalans för alternativ 3 i mm/år. Den övre raden visar flödet in i modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD) och från grundvattenbildningen (RCH) samt summan av dessa (Total In). Den undre raden visar flödet ut ur modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD), tunneln/schaktet (Drain Out) samt summan av dessa. Flödet från tunneln har också räknats om till l/min per 100 m tunnel i bilden längst till höger.

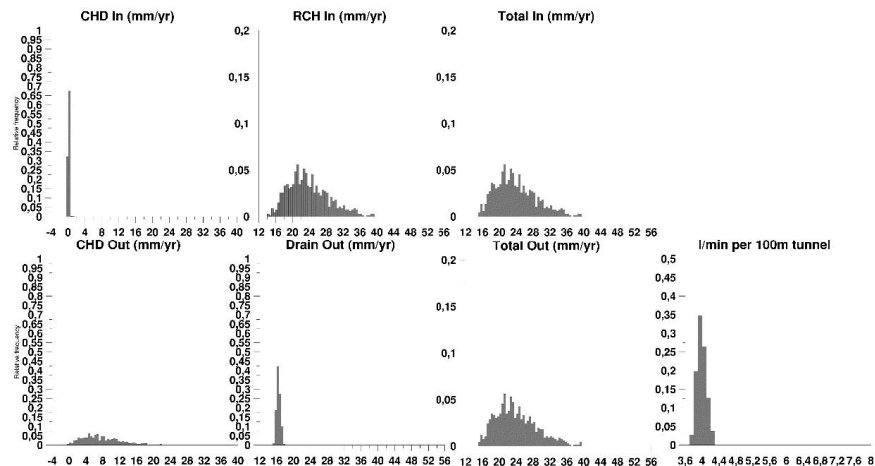
Grundvattenpåverkan i alternativ 3 (Figur 24) utgörs av begränsade grundvattensänkningar närmast tunneln. Däremot visar i princip samtliga simuleringar att tätningen av tunnel och schakt kan orsaka en grundvattenhöjning öster om dessa.



Figur 24 5:e, median och 95:e percentil för grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 3. Den streckade linjen visar gränsen mellan grundvattensänkning (positiva värden) och grundvattenhöjning (negativa värden).

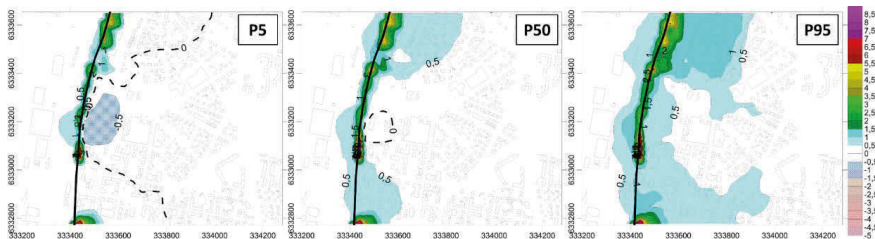
10.4 Alt 4 (VF4I) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under schakt.

I alternativ 4 har en dränering under schaktet modellerats för att minska effekten av grundvattenhöjningen som framkom i alternativ 3. Vattenbalansen för alternativ 4 är i samma storleksordning som för alternativ 3. Inläckaget har ökat något till ca 4 l/min per 100 m till följd av det dränerande skiktet, se Figur 25.



Figur 25 Histogram som beskriver vattenbalans för alternativ 3 i mm/år. Den övre raden visar flödet in i modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD) och från grundvattenbildningen (RCH) samt summan av dessa (Total In). Den undre raden visar flödet ut ur modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD), tunneln/schaktet (Drain Out) samt summan av dessa. Flödet från tunneln har också räknats om till l/min per 100 m tunnel i bilden längst till höger.

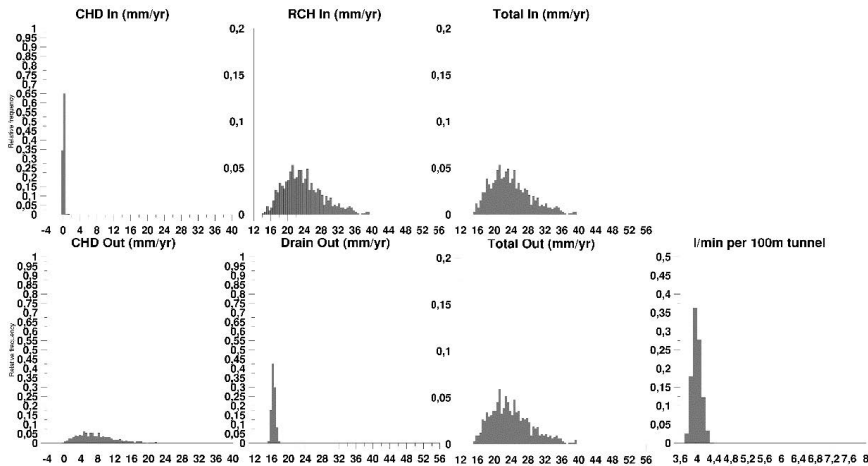
Modelleringen av förändrade grundvattennivåer för alternativ 4 visar att förekomsten av förhöjda grundvattennivåer minskar kraftigt jämfört med alternativ 3 (Figur 26) Däremot ökar utbredningen av grundvattensänkning till följd av det dränerande skiktet eftersom det skapar en strömmingsväg från områden med högre nivåer till lägre.



Figur 26 5:e, median och 95:e percentil för grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 4. Den streckade linjen visar gränsen mellan grundvattensänkning (positiva värden) och grundvattenhöjning (negativa värden).

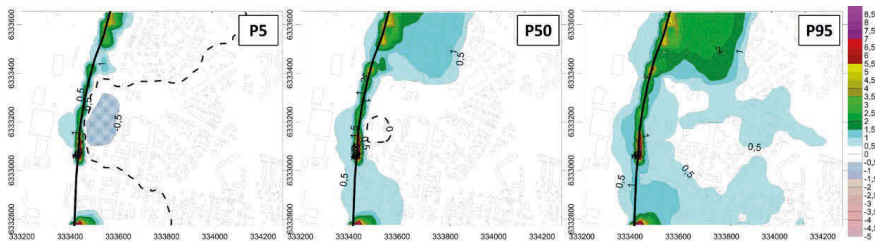
10.5 Alt 5 (VF4m) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under och vid sidan om schakt.

För att ytterligare undersöka hur ett dränerande skikt vid sidan om tätande schakt påverkar vattenbalans och grundvattennivåer förekommer dränering i detta scenario i samtliga celler upp till marknivå. Vattenbalansen för alternativ 5 är i princip identisk med alternativ 4, se Figur 27.



Figur 27 Histogram som beskriver vattenbalans för alternativ 3 i mm/år. Den övre raden visar flödet in i modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD) och från grundvattenbildningen (RCH) samt summan av dessa (Total In). Den undre raden visar flödet ut ur modellen från den konstanta nivån vid havet (CHD), tunneln/schaktet (Drain Out) samt summan av dessa. Flödet från tunneln har också räknats om till l/min per 100 m tunnel i bilden längst till höger.

Jämfört med alternativ 4 ökar grundvattensänkning till följd av ytterligare lager med dränerande skikt utmed schakten, se Figur 28.



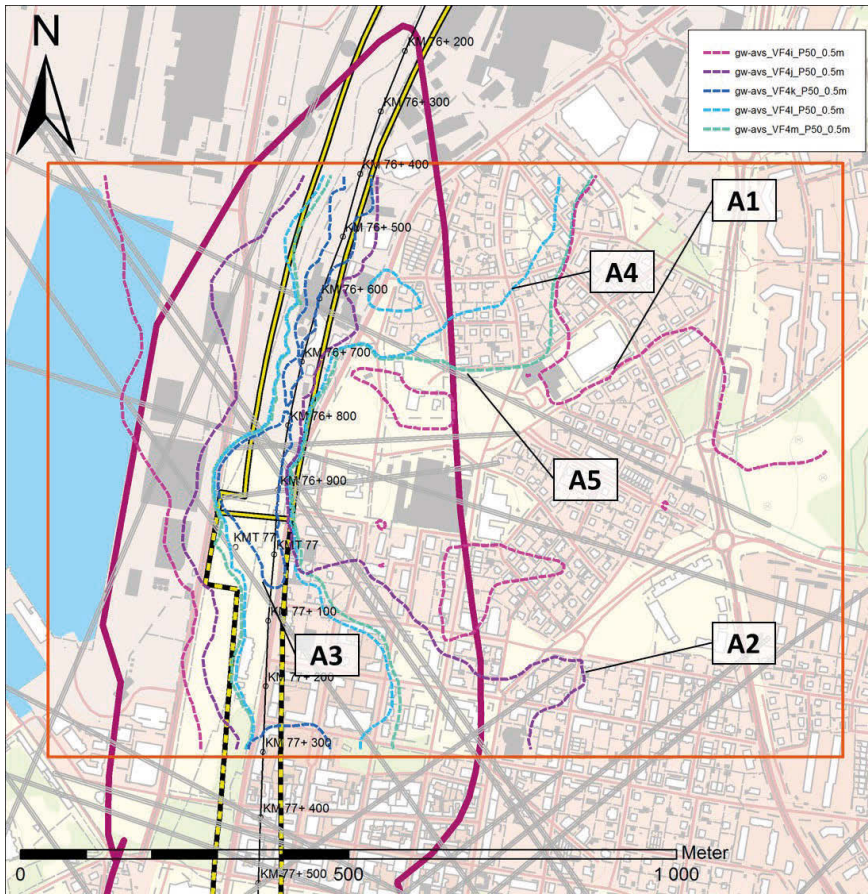
Figur 28 5:e, median och 95:e percentil för grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 5.

10.6 Jämförelse av grundvattensänkning mellan alternativ 1-5

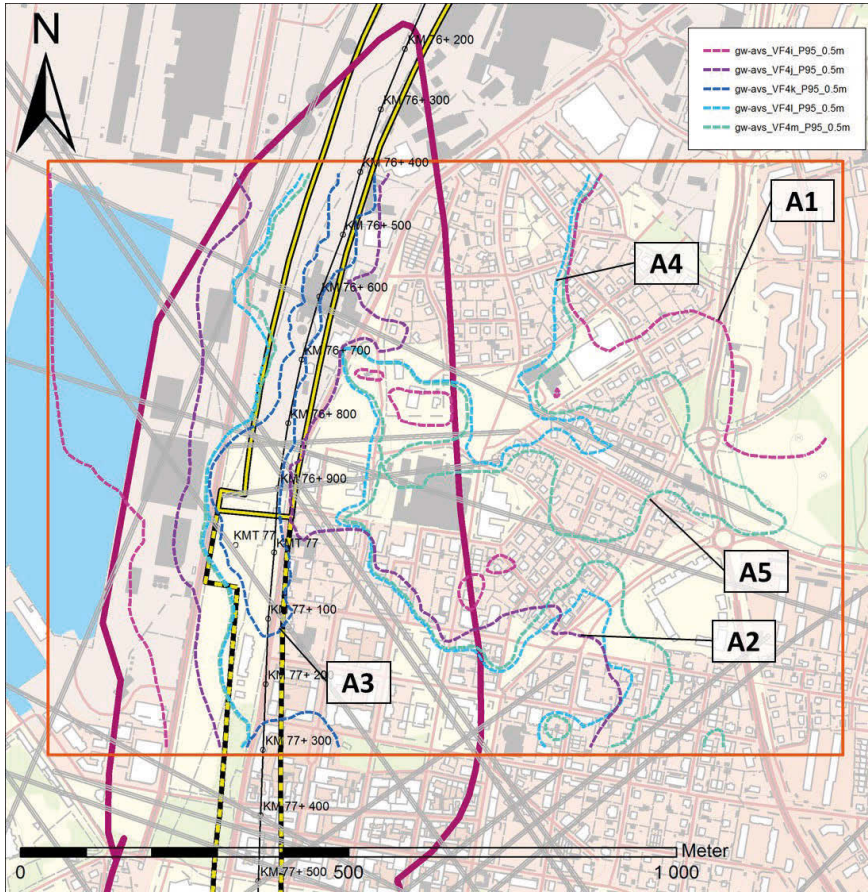
Gränsen för 0,5 meters grundvattensänkning för medianen och den 95:e percentilen har jämförts mellan de olika alternativen i Figur 29 och Figur 30. Inom linjen för medianvärdet är det större sannolikhet än inte att gw-sänkningen är mera än 1 meter och utanför linjen för medianvärdet är det mindre än 50% sannolikhet att gw-sänkningen är > 0,5 m. Likadant att det utanför linjen för P95 är mindre än 5 % sannolikhet att gw-sänkningen är mindre än 0,5 m.

Modelleringen visar att det är viktigt att både tunnel och schakt blir så täta som möjligt för att motverka en omfattande grundvattensänkning (alternativ 1). Eftersom grundvattenbildningen i de kalibrerade modellerna generellt sett är låg kan ett förhållandevis litet inläckage orsaka en betydande grundvattensänkning. Modelleringen visar också att om schaktet blir alltför tätt så kan det orsaka en barriär för grundvattenströmningen och ge upphov till förhöjda grundvattennivåer (Alternativ 3). För att förhindra detta planeras tätning av schakt och tunnel samt att ett dränerande skikt installeras vid schaktet. Denna dränering kan dock i sin tur ge upphov till en grundvattensänkning om den skapar en strömningsväg från områden med högre liggande områden till lägre liggande områden (alternativ 4 och 5).

Om designen av tätning och dränerande skikt skulle ge upphov till grundvattensänkningar som inte kan anses vara acceptabla bör det utredas om infiltration kan användas för att upprätthålla grundvattennivåerna inom ett sådant område. Vidare rekommenderas installation av grundvattentrör på större avstånd från anläggningen än de som finns idag för att bekräfta rådande grundvattensituation samt en eventuell påverkan från den planerade anläggningen.



Figur 29 Medianvärden för utbredning av 0,5 m grundvattensänkning i alternativ 1-5 samt påverkansområde från PM Hydrogeologi (lila linje) (Sundlöf et al., 2016). Påverkansområdet från PM hydrogeologi har modifierats i senare handlingar.



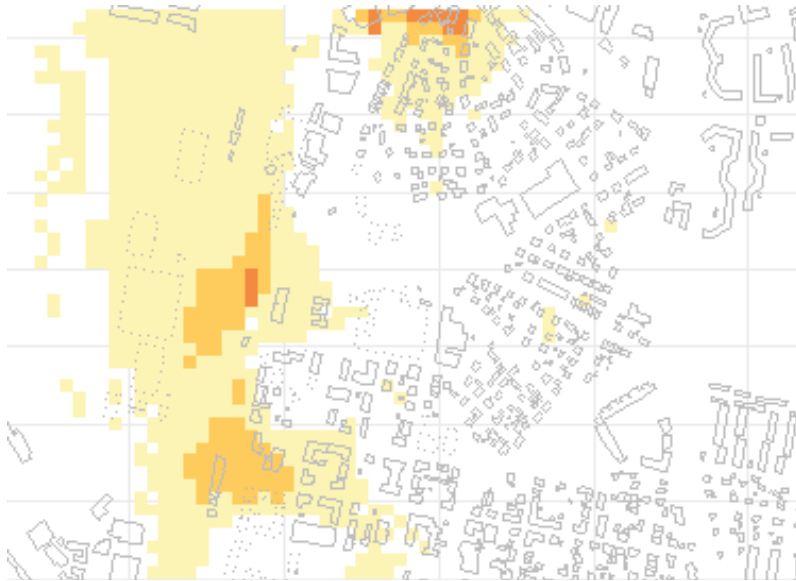
Figur 30 95:e percentilen för utbredning av 0,5 m grundvattensänkning i alternativ 1-5 samt påverkansområde från PM Hydrogeologi (lila linje) (Sundlöf et al., 2016). Påverkansområdet från PM hydrogeologi har modifierats i senare handlingar.

11 REFERENSER

- Aquaveo. (2017). Groundwater Modeling System Version 10.3 (Version 10.3). UT, USA. Retrieved from <http://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction>
- Doherty, J. (2003). Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. *Ground Water*, 41(2), 170-177. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02580.x
- Doherty, J., & Hunt, R. J. (2010). *Approaches to highly parameterized inversion: a guide to using PEST for groundwater-model calibration*: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.
- Freeze, R. A., Massmann, J., Smith, L., Sperling, T., & James, B. (1990). Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework. *Ground Water*, 28(5), 738-766. doi:10.1111/j.1745-6584.1990.tb01989.x
- Gustafson, G. (2012). *Hydrogeology for rock engineers*. Stockholm: BeFo - Rock Engineering Research Foundation.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process*: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.
- LeGrand, H. E., & Rosén, L. (2000). Systematic Makings of Early Stage Hydrogeologic Conceptual Models. *Ground Water*, 38(6), 887-893. doi:10.1111/j.1745-6584.2000.tb00688.x
- Martinsson, S., Simonsson, D., Göransson, B., & Sundlöf, B. (2016). *PM HYDRAULISKA TESTER*. (101107-08-025-206). Göteborg: Trafikverket
Retrieved from <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Halland/projekt-i-hallands-lan/Varberg-dubbelspar-i-tunnel-och-resecentrum/Dokument/>.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58(8), 1246-1266.
- Niswonger, R. G., Panday, S., & Ibaraki, M. (2011). *MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005* (6-A37). Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A37>
- Reilly, T. (2001). *System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation*. Retrieved from https://pubs.usgs.gov/twri/twri-3_B8/pdf/twri_3b8.pdf
- Sundell, J., Rosén, L., & Haaf, E. (2017). *Metodbeskrivning av probabilistisk modell för berg-, jordlager och grundvattennivåer - Varbergstunneln*. Retrieved from Göteborg:
- Sundlöf, B., Martinsson, S., Simonsson, D., Åkesson, M., & Aneljung, M. (2016). *Projekterings-PM Hydrogeologi*. (101107-08-025-250). Göteborg: Trafikverket.

DEL 3

METODBESKRIVNING AV PROBABILISTISK MARKSÄTTNINGSMODELL VID GRUNDVATTENSÄNKNING VARBERGSTUNNELN



INNEHÅLL

1	Inledning	101
1.1	Syfte med modellen	102
1.2	Höjd och koordinatsystem	102
2	Metod	103
2.1	Jordlagermodell och vertikal spänning	103
2.2	Rådande grundvattenförhållanden	104
2.3	Riskområde för marksättningar	105
2.4	Rådande portryck	106
2.5	Förändrade portryck efter fullständig konsolidering	109
2.6	Förändrade portryck under pågående konsolidering	110
2.7	Beräkningsmodell	112
2.8	Datahantering och beroende mellan parametrar	112
2.9	Rumsliga skillnader och skillnader mellan grupper	116
2.10	Sannolikhetstäthetsfunktioner	117
2.11	Simulering av marksättning	117
3	Dataunderlag	121
4	Statistisk analys	125
5	Riskområde för marksättning	129
6	Spatiell simulering av marksättning	131
6.1	Alt 1 (VF4i) – Helt utan tätning	131
6.2	Alt 2 (VF4j) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-7$ m/s	133
6.3	Alt 3 (VF4k) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s	134
6.4	Alt 4 (VF4l) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under schakt.135	
6.5	Alt 5 (VF4m) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under och vid sidan om schakt	136
7	Slutsats och diskussion	137
8	Referenser	138

I INLEDNING

I tidigare utredning i systemhandlingsskede för Varbergstunneln har lerans kompressionsegenskaper undersökts för ett antal platser utmed sträckan, se MUR geoteknik (Hurtig et al., 2016) och sammanställning av härledda värden (Trafikverket, 2016). Från dessa undersökningar har sedan marksättningens storlek beräknats för ett antal sektioner utmed tunnellen (Möller et al., 2016b). Eftersom en grundvattensänkning kan förekomma över en större yta innebär det att marksättningens storlek även behöver beräknas för hela detta område och inte endast på de platser där provtagning har genomförts. Inom det bedömda påverkansområdet för den planerade grundvattensänkningen (Sundlöf et al., 2016) har beräkningar för hur omgivande fastigheter påverkas av skadliga marksättningar genomförts (Möller et al., 2016a). Dessa beräkningar baseras på generella antaganden om jordlagrens geotekniska egenskaper, beräknad grundvattensänkning och känsligheten för sättnings hos enskilda byggnader.

Den stora ytan för den förväntade grundvattensänkningen innebär heterogena markförhållanden som inte kan beskrivas i detalj, särskilt i förhållande till de relativt få undersökningsplatser där lerans kompressionsegenskaper bestämts. För att beakta de osäkerheter som det ofullständiga underlaget medför har vi i denna rapport använt probabilistiska metoder för att beräkna sannolikheten av en marksättning av en viss storlek över hela det område där en grundvattensänkning kan förekomma. Beräkningarna baseras på statistiska metoder för att undersöka om det finns signifikanta skillnader i kompressionsegenskaper vid gruppering av proverna med avseende på plats, provkvalitet och jordartsklassning. Baserat på resultatet av denna indelning beskriver vi sannolikhetsfördelningar för kompressionsegenskaperna. Sannolikhetsfördelningarna beaktar vertikala trender mot djupet och beroenden mellan ingående parametrar. Vidare kombineras tidigare redovisade probabilistiska modeller för jordlager, bergnivå, grundvattennivå och grundvattensänkning med kompressionsegenskapernas sannolikhetsfördelningar för att simulera marksättningens storlek probabilistiskt. Sättningsberäkningarna baseras på en endimensionell elasto-plastisk kompressionsmodell (Larsson & Sällfors, 1981). Från resulterande simuleringar erhålls sannolikhetsfördelningar för marksättningens storlek för samtliga beräkningspunkter. Baserat på dessa fördelningar kan sannolikheten för en marksättning av en viss storlek på en viss plats beräknas. Dessa beräkningar redovisas både efter fullständig konsolidering samt efter sex månader från det att grundvattenpåverkan initierats.

Den ovan beskrivna metoden har vidareutvecklats från tidigare fallstudier i Trafikverksprojektet Förbifart Stockholm (Sundell et al., 2013) samt Svenska Kraftnäts projekt City Link Tunnel Sundell and Haaf (2015) Metoden är också vidareutvecklad från vad som redovisats i (Sundell et al., 2017a).

1.1 Syfte med modellen

Det övergripande syftet med modellpaketet är att urskilja områden som riskerar att drabbas av marksättningar till följd av grundvattensänkning från den planerade Varbergstunneln. Syftet uppnås genom en beräkningsmodell där osäkerheter i kompressionsegenskaper, jordgeometri och grundvattensänkning beaktas. Beräkningen genomförs för motsvarande område och scenarier för tätning och dränering som har redovisats i delrapporten för grundvattenmodellen (Sundell et al., 2018). Nedan listas ett urval av modellens detaljerade syften:

- Bedömning av riskområden för marksättning.
- Bedömning av risk för marksättning mellan de alternativ som presenterats i delrapport 2.
- Underlag för bedömning av risk för sättningsskador på befintliga byggnader och anläggningar.
- Underlag för bedömning av behov av riskreducerande åtgärder.
- Visualisering. Genom modellen kan en samlad bedömning av information från sonderingar, grundvattenmätningar, kolvprovtagning mm presenteras på ett tydligt sätt.

1.2 Höjd och koordinatsystem

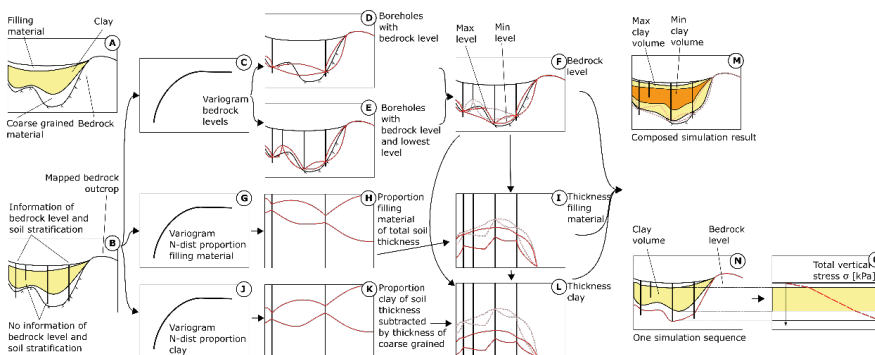
I följande rapport används höjdsystem är RH2000 och koordinatsystem är SWEREF 99 TM. Samtliga data har konverterats till dessa format. Sättningsberäkningar har genomförts i punkter med 20 m avstånd från varandra. Resultatet från dessa beräkningar har interpolerats för att möjliggöra en rumslig redovisning över en yta.

2 METOD

Detta avsnitt beskriver metod och antaganden för den probabilistiska modellen för sättningsberäkningar. I denna modell ingår tidigare redovisade jordlager- och grundvattenmodeller, beräkning av portryck och effektivspänning från dessa, den endimensionella kompressionsmodellen, datahantering och statistisk analys av kompressionsparametrar samt simulering av marksättning.

2.1 Jordlagermodell och vertikal spänning

Modellen för jordlager- och bergnivåer (Sundell et al., 2017b) beskriver stratigrafi i och mellan borrhögar och platser för ytkartering. Även om metoden har presenterats tidigare följer här en sammanfattning. Jordlagerföljden inom området har förenklats till tre kontinuerliga lager: fyllnadsjord/grovkornig jord (överst), lera (främst siltig eller sandig) samt grovkornig jord (morän eller glaciälviala avlagringar) ovan berget (Figur 1A). Eftersom samtliga borrhål inte innehåller all nödvändig information för att bygga modellen baseras metoden på en stegvis process. Härigenom beaktas all tillgänglig information och beroenden mellan lager. Följande information kan erhållas från borrhålen (Figur 1B): bergnivåer, lägsta nivå utan att berget kan bekräftas samt helt eller delvis tolkade jordlagerföljder. Karterade områden med bergytan nära markytan ingår också i modellen.



Figur 1 Simulering av jordlager-, bergnivåer och vertikal spänning, modifierad från Sundell et al. (2017a).

I ett första steg upprättas en variogrammodell, baserad på data från borrhål med bergnivåer (Figur 1C). Variogrammodellen beskriver lägesberoendet för den egenskap som studeras. Variogrammet utgör grunden för den interpolation av egenskaper som görs med s.k. Kriging. Från Kriging-interpolation med borrhål med bergnivåer erhålls en matris med medelvärden och standardavvikelser. Dessa används för att simulera möjliga variationer för bergets nivå (Figur 1D). På samma sätt beräknas medelvärden och standardavvikelser från ett dataurval som både innehåller borrhål med bergnivåer och borrhål där berget inte har påträffats (Figur 1E). Vid simulering av Figur 1D och Figur 1E simuleras alltid samma kvantil (t.ex. jämförs medianen i D med medianen i E) och det lägsta värdet av dessa väljs som resulterande bergnivå. Som ett resultat av denna

process beaktas borrhål med en djup lägstanivå nära bergytan samtidigt som borrhål som har en grund lägstanivå nära markytan inte beaktas i modellen.

Från borrhål med information om jordlagerföljder definieras parametern z_{pb} som proportionen av lera av de två understa jordlagren (mäktighet lera delat med mäktigheten för den totala jordlagermäktigheten subtraherat med det översta lagrets mäktighet) transformerad till normalfördelning genom fördelningsfunktionen för den standardiserade normalfördelningen med medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1 $N(0,1)$. Detta steg är nödvändigt eftersom simuleringen av jordlagren är oberoende av tidigare bergnivåsimulering. Från de transformerade värdena modelleras ett variogram (Figur 1J). För att simulera lerans läge i jordprofilen introduceras också parametern z_{pa} som definieras av proportionen av det översta lagret (filling material i Figur 1) av den totala jordlagermäktigheten transformerad till $N(0,1)$ på samma sätt som för z_{pb} . Likasom för bergnivåmodellen ger variogrammen för z_{pb} (Figur 1J) och z_{pa} (Figur 1G) förväntade värden och standardavvikelser för dessa. I ett första steg simuleras proportionen av det översta jordlagret genom z_{pa} (Figur 1H). Mäktigheten av det översta jordlagret erhålls genom att multiplicera denna proportion med den totala jordlagermäktigheten (Figur 1I). Den totala jordlagermäktigheten ges av markytans nivå subtraherat med bergnivåmodellen. I ett andra steg simuleras proportionen lera av de två understa lagren genom z_{pb} . Från denna proportion, det översta lagrets mäktighet samt den totala mäktigheten kan sedan lerans mäktighet och nivåer för dess över- och underkant beräknas (Figur 1N).

I varje simuleringssekvens beräknas den totala vertikala spänningen (σ) i jordlagren utifrån bestämning av materialens densitet i ett antal provtagningspunkter, se avsnitt 3 och Figur 1O. Ytlaster från t.ex. byggnader (ev inkl källare) eller dylikt samt typ av grundläggning har ej inkluderats i modellen och beräkningen av vertikala spänningar. Eftersom ett stort antal borrhål med bergnivåer och jordlagerföljder förekommer nära varandra inom området kan jordlagerföljder och totalspänning modelleras med en hög rumslig upplösning. Jordlagermodellen har modellerats med 5x5 m upplösning men eftersom de fortsatta beräkningarna kräver mycket datorkapacitet har upplösningen minskats till 20x20 m. Denna upplösning bedöms vara tillräcklig för att både hantera individuella riskobjekt som kan drabbas av en skadlig marksättning och för att beskriva de heterogena jordförhållandena. För var och en av dessa beräkningspunkter skapas en vektor med en vertikal upplösning om 0,1 m för beräkning av σ .

2.2 Rådande grundvattenförhållanden

Likasom för modellen för bergnivåer och jordlagerföljd har metod och resultat för grundvattenmodellen beskrivits i tidigare delrapport (Sundell et al., 2018). En sammanfattning av principerna för metoden följer nedan. Grundvattenmodelleringen utgår från att det förekommer en variabilitet i de hydrogeologiska egenskaperna för respektive jordlager- och bergmaterial. Gränserna för dessa material definieras av modellen för jordlagerföljd- och bergnivåer samt förekomst av framträdande

sprickzoner. Avgränsningen av materialen i grundvattenmodellen utgår endast från medianvärden för respektive material och inte den probabilistiska modellen. Istället tillåts parametervärdena för respektive material variera. Denna förenkling är nödvändig av tekniska skäl men bedöms dock inte vara av någon större betydelse eftersom den hydrauliska transmissiviteten, T (m^2/s), för ett lager styr grundvattenflödet i ett lager. T erhålls genom att multiplicera den hydrauliska konduktiviteten, K (m/s), med lagrets mäktighet. Den hydrauliska konduktiviteten uppvisar en betydligt större variabilitet än mäktigheten, vilket innebär att mäktigheten ger ett mycket litet bidrag till variabiliteten av T .

Parametervärdenas (K och grundvattenbildning) övre- och undre nivåer ansätts utifrån vad som är rimligt för respektive material. Eftersom egenskaperna är heterogena inom respektive material utgår modelleringen från att egenskaperna kan variera mellan olika platser. På platser där ett tillförlitligt test (t.ex. en provpumpning) har genomförts kan ett konstant värde på materialparametern ansättas. Den probabilistiska modelleringen baseras på principen att flera olika modeller där samtliga är rimliga och lika sannolika men med betydande skillnader i parameteruppsättning, kan uppnå samma kalibreringsmål. Kalibreringsmålen definieras av acceptabla avvikelser från tillgängliga grundvattennivåobservationer (medelgrundvattennivåer) samt huruvida grundvattenbildningen och vattenbalansen bedöms rimlig för modellen. Principen för kalibreringen uppfylls genom att simulera parametervärden inom de intervall som är ansatta för respektive material. Simuleringen för en modell pågår tills dess att tillräckligt god anpassning till observerade grundvattennivåer har uppnåtts. Denna process upprepas sedan för flera modeller ett bestämt antal gånger. Till sist erhålls ett antal (n) modeller med olika parameteruppsättningar där samtliga uppfyller samma kalibreringsmål. I fallstudien erhöles 731 st. kalibrerade modeller där kalibreringsmålen är uppfyllda. För de tre exemplen i den vänstra delen av Figur 2 är skillnaden i modellerade grundvattennivåer liten inom området där grundvattennivåobservationer finns ("groundwater observation wells") samtidigt som skillnaden är större i området där observationer saknas. Modelleringen genomförs med kalibreringsverktyget PEST i finit-differens grundvattenmodelleringskoden MODFLOW.

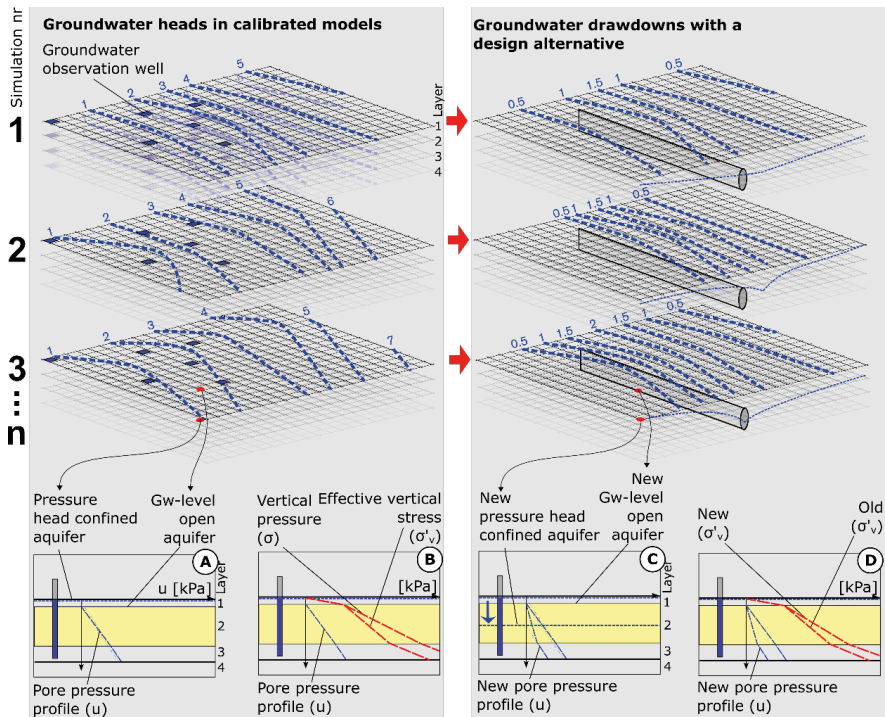
2.3 Riskområde för marksättningar

I delrapport 1 definierades ett riskområde för marksättningar av sannolikheten att grundvattennivån i det undre magasinet överstiger lerans underkant med mer än en meter. Denna definition baseras på att grundvattensänkning främst kommer att förekomma i det undre magasinet samt att grundvattnets trycknivå måste vara inom volymen för lera. Om grundvattennivån i det undre magasinet är under lerans underkant kommer följaktligen ingen marksättning att uppkomma. Beräkningen av riskområdet baserades på den probabilistiska modellen för jordlager- och bergnivåer samt en icke-probabilistisk interpolering av grundvattennivåer. I och med den probabilistiska grundvattenmodellen kan riskområdet uppdateras med variationer av grundvattennivåer i beaktande.

I den uppdaterade beräkningen simuleras först en jordlagerföljd i varje grid-punkt enligt vad som har redovisats i Sundell et al. (2017b). Sedan slumpas ett värde för grundvattennivån i det slutna magasinet (lager 3 i grundvattenmodellen) från samtliga accepterade modeller ($n=731$). Eftersom samtliga accepterade modeller bedöms vara lika sannolika sker denna randomisering från en uniform fördelning $U(1,n)$. Från upprepade simuleringar erhålls sannolikhetsfördelningar för hur stor andel av leran som är under grundvattnets trycknivå i det undre magasinet i varje grid-punkt. Från de resulterande fördelningarna kan sedan områdena för där 50:e och 95:e percentilen av simuleringarna överstiger en meter redovisas på samma sätt som i delrapport 1.

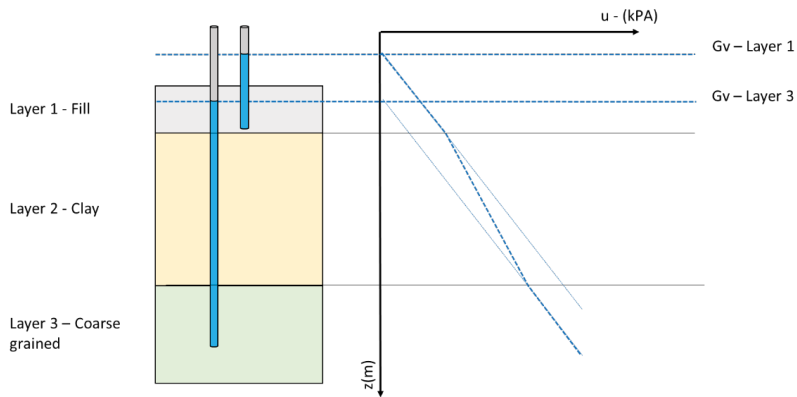
2.4 Rådande portryck

Som redovisats i avsnitt 2.1 simuleras en jordlagerföljd och totalspänning σ i en vertikal vektor för varje grid-punkt inom modellområdet. På samma sätt som för riskområdet för marksättning simuleras en grundvattennivå i det undre grundvattenmagasinet under leran (lager 3) men också en grundvattennivå i det övre grundvattenmagasinet över leran (lager 1) från de accepterade modellerna $U(1,n)$. Från dessa beräknas portrycket (u) i leran, se Figur 2A och redovisning av fall 1-3 nedan. Grundvattenmodellen har kalibrerats mot observationer med antagna medelgrundvattennivåer där avvikelser upp till 1 meter mellan simulerad och observerad nivå anses acceptabla. Eftersom lerans portryck beräknas från grundvattenmodellen representeras också portrycksnivåerna denna medelnivå med avvikelser upp till en meter på platser med grundvattennivåobservationer. På platser där grundvattennivåobservationer saknas är såväl variationer i grundvattennivåer och portryck större.



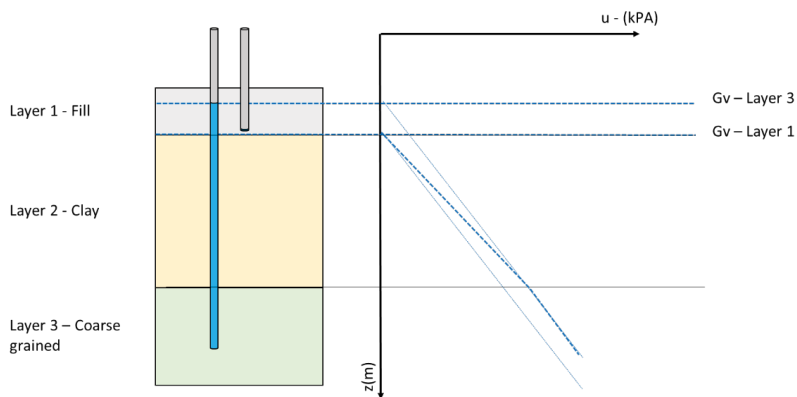
Figur 2 Beräkning av portryck och effektivspänning baserat på grundvattenmodeller innan respektive efter grundvattensänkning. Notera att i exemplet sker ingen förändring i grundvattennivå i det övre magasinet (lager 1) utan endast i det undre magasinet (lager 3).

I det första fallet (Fall 1, Figur 3) är grundvattennivån i det övre magasinet över lerans överkant. I detta fall är portrycket i lager 1 och 3 linjärt med grundvattnets trycknivå för respektive lager. Mellan lerans över- och underkant beräknas sedan portrycket som en rät linje mellan dessa.



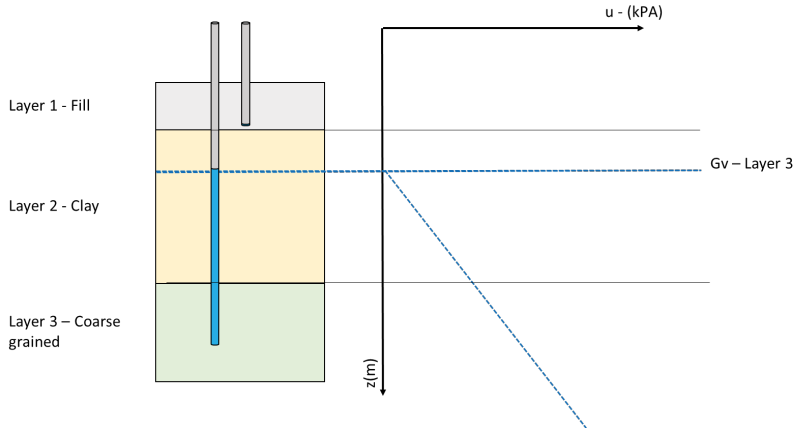
Figur 3 Fall 1 - Beräkning av portryck i leran för fall där både grundvattennivån i det övre magasinet (lager 1) och i det undre magasinet (lager 3) överstiger lerans överkant. Grundvattennivån kan vara över markens nivå i det övre magasinet i områden vid havet.

För fall 2 överstiger grundvattennivån i lager 3 lerans överkant men om lager 1 är torrt antas grundvattennivån i lager 1 till lerans överkant enligt Figur 4. För de fall där grundvattenmodellen visar att ett lager är torrt tilldelas det en grundvattennivå som motsvarar lagrets underkant. Eftersom lagernivåerna i grundvattenmodellen är konstanta (lagerindelningen är baserad på beräknade medelvärden för respektive lager) men varierar i sättningsmodellen (osäkerheter i lagerföljder beaktas) innebär denna ansats att grundvattennivån i det översta lagret varierar med simuleringen av lerans överkant för detta fall.



Figur 4 Fall 2 - Beräkning av portryck i leran där det övre magasinet (lager 1) är torrt samtidigt som grundvattennivån i det undre magasinet (lager 3) överstiger lerans överkant.

För fall 3 där lager 1 är torrt och grundvattennivån i lager 3 understiger lerans överkant antas portrycket genom leran vara hydrostatiskt med grundvattnets trycknivå i lager 3 enligt Figur 5.

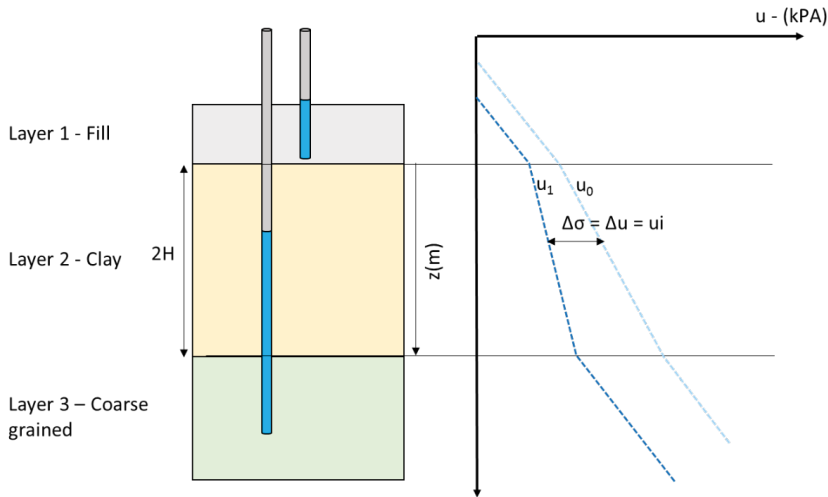


Figur 5 Fall 3 - Beräkning av portryck i leran där lager 1 är torrt och grundvattennivån i det undre magasinet (lager 3) understiger lerans överkant.

Från σ och u kan den rådande vertikala effektivspänningen (σ'_v) beräknas, se Figur 2B.

2.5 Förändrade portryck efter fullständig konsolidering

De förändrade portrycksförhållandena vid fullständig konsolidering till följd av de påverkade grundvattenförhållandena med tunneln modelleras från grundvattenmodellerna med åtgärdsalternativ enligt delrapport 2 (Sundell et al., 2018). Precis som för modelleringen av rådande förhållanden beräknas de förändrade portrycksnivåerna enligt fall 1–3 ovan (Figur 2C). Från dessa beräknas en ny effektivspänning (Figur 2D). För varje kalibrerad modell simuleras en grundvattensänkning för varje åtgärdsalternativ, se röda pilar i Figur 2 samt delrapport 2 för fullständig redovisning (Sundell et al., 2018). För att säkerställa att skillnaden i grundvattensänkning beräknas mellan en viss kalibrerad modell och simulerad grundvattensänkning för densamma väljs därför samma simuleringsnummer från $U(1,n)$ för båda dessa. I Figur 2 redovisas denna beräkning för en grid-punkt (två röda punkter) i simuleringsnummer 3 där grundvattennivåer i lager 1 och 3 används för att simulera rådande och förändrade portrycksförhållanden. Motsvarande beräkning framgår av Figur 6 där en grundvattensänkning från fall 1 (u_0) (Figur 3) genererar en ny portrycksprofil (u_1). Skillnaden (Δu) mellan u_0 och u_1 ger en förändrad effektivspänning ($\Delta\sigma$) som ger upphov till en marksättning.



Figur 6 Exempel på portryck under rådande förhållanden innan grundvattensänkning (u_0) samt efter grundvattensänkning (u_1) vid fullständig konsolidering.

2.6 Förändrade portryck under pågående konsolidering

Eftersom lera har en låg hydraulisk konduktivitet relativt en mer grovkornig jord blir de förändrade portrycksförhållandena till följd av grundvattenpåverkan tidsfördröjda. Beräkningen av förändrade portryck efter en viss tid baseras på beräkningen av fullständig konsolidering enligt vad som redovisats ovan. I och med detta beaktas endast magasinering av vatten i leran och inte i övriga jord- och berglager. Detta innebär att det förändrade portrycket efter en viss tid överskattas något även om grundvattenpåverkan sker snabbare i de mer permeabla jordlagren än i leran. Förändring av grundvattennivåer över tid i samtliga lager inklusive leran och sedermera beräkning av portryck är dock möjligt i grundvattenmodelleringskoden MODFLOW. Eftersom transient kalibreringsdata saknas för hela modellområdet utslöts denna ansats.

Baserat på beräkningar av förändrade portryck ovan har medelkonsolideringsgraden efter en viss tid beräknats genom konsolideringskoefficient (c_v) och tidsfaktor (T_v). Även dessa beräknas i en vektor i varje grid-punkt för varje simulering där

$$c_v = \frac{k \cdot M_L}{\gamma}, \quad (1)$$

och

$$T_v = c_v \frac{t}{H^2}, \quad (2)$$

I dessa ekvationer är:

k – hydraulisk konduktivitet för leran (m/s).

M_L – modulen M_L (kPa), se avsnitt 2.7.

γ – tungheten för vatten (kN/m³).

t – vald tidpunkt efter att dräneringen av leran påbörjats till följd av grundvattenpåverkan (s).

H – dräneringsvägens längd, vald till halva lermäktigheten i denna rapport då grundvattenpåverkan antas i både lagret över och under leran (m).

Från dessa ekvationer kan det förändrade portrycket beräknas genom en finit-differenslösning med Terzaghis endimensionella konsolideringsekvation (Terzaghi, 1943). I detta fall används istället en lösning som baseras på Fourier-serier enligt Taylor (1948) (ekvation 10-28) där konsolideringskoefficienter (U_z) beräknas:

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T_v}, \quad (3)$$

I denna ekvation är:

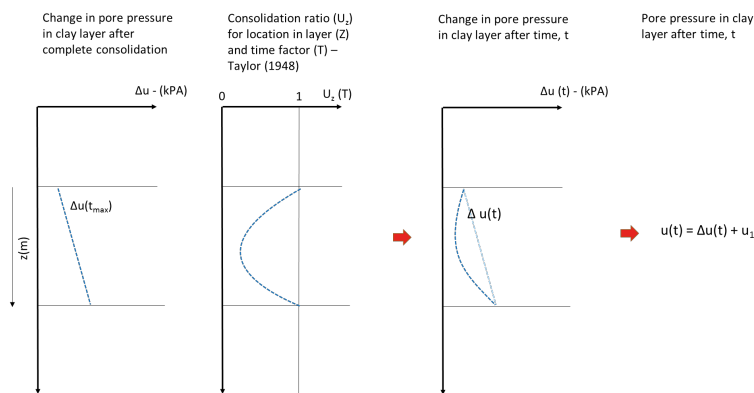
$$m = \frac{n-1}{2}, \quad (4)$$

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,

$$M = \frac{1}{2} \pi (2m + 1), \quad (5)$$

z – djupet under lerans överkant (m).

Från U_z , portrycksförändringen (Δu) och portrycket (u_1) efter full tid (t_{max}) kan sedan portrycket efter en viss tid, $u(t)$, beräknas enligt Figur 7. Från denna kan sedan den förändrade $\sigma'_v(t)$ beräknas på motsvarande sätt som redovisats ovan.



Figur 7 Beräkning av förändrat portryck efter en viss tid, $\Delta u(t)$, med konsolideringskoefficienter (U_z).

2.7 Beräkningsmodell

Beräkningsmodellen baseras på en endimensionell elasto-plastisk kompressionsmodell (Larsson & Sällfors, 1981). I denna modell har leran tre olika styvhetsfall enligt Tabell 1 (Ekvation I-IV). Vilket fall som väljs styrs av om $\sigma'_v + \Delta\sigma$ överskrider förkonsolideringstrycket, σ'_c , respektive gränsspänningen, σ'_L . Beräkningar genomförs både för Δu efter full konsolidering och $\Delta u(t)$ efter viss tid. I beräkningarna antas den elastiska sättningen utbildas momentant då lasten (grundvattensänkning) påförs. Ekvation 4 används för att integrera lösningarna för ekvation 1-3 utmed vektorn i varje grid-punkt.

Tabell 1 Ekvationer för beräkning av sättning.

	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	-	$s = \int_0^{z_{max}} \delta(z) dz$

I ekvationerna I-III i tabell 1 är:

M_0 - modul för spänningstillstånd under förkonsolideringstrycket, σ'_c .

M_L - modul för spänningstillstånd ovan förkonsolideringstrycket, σ'_c , och under gränsspänningen, σ'_L .

M' - kompressionsmodultal.

2.8 Datahantering och beroende mellan parametrar

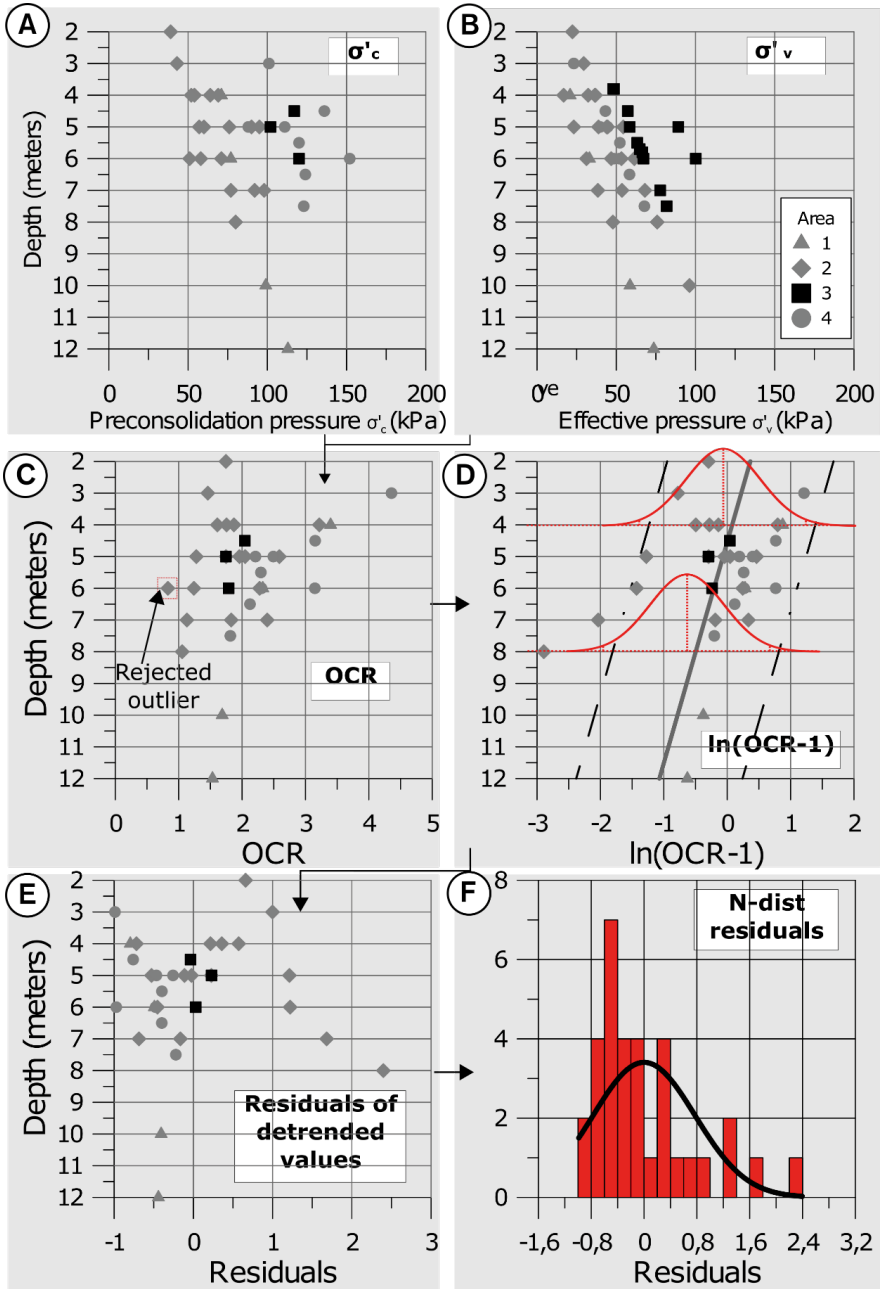
Innan sannolikthetsfunktioner (PDFs) för Monte Carlo-simuleringar (MC) kan konstrueras måste det säkerställas att ingående variabler är oberoende av varandra. I ett första steg undersöks beroendet mellan den rådande effektivspänningen (σ'_v) innan grundvattenpåverkan och förkonsolideringstrycket (σ'_c) statistiskt, se Figur 8.

Förhållandet mellan dessa definieras av överkonsolideringsgraden, OCR (σ'_c / σ'_v). σ'_v kan inte vara större än σ'_c eftersom σ'_c representerar det högsta värdet av en historisk effektivspänning (undantaget om konsolidering/sättningar pågår). Detta förhållande villkorar beroendet mellan σ'_v och σ'_c till att $OCR > 1$. Med detta villkor måste de värden

där OCR beräknats till <1 noga utvärderas. Anledningar till att utesluta dessa värden inkluderar t.ex. störningar under provtagning eller transport av prover. Uteslutna värden markeras med den röda rektangeln i (Figur 8C), se avsnitt 3 för detaljer.

Efter att dessa värden har uteslutits transformeras värdena om genom den naturliga logaritmen (\ln) till normalfördelade värden (Figur 8D). Innan detta steg subtraheras OCR-värdena med 1 för att villkora den senare MC simuleringen till att $OCR > 1$. Ln-transformeringen är nödvändig för att säkerställa homoskedastiska skillnader (att residualernas varians är lika på varje vertikalt intervall utmed djupet, se Figur 8D exemplifierat för djup på 4 och 8 meter). Eventuella vertikala trender undersöks med linjär regression (Figur 8D) vilket resulterar i residualerna (Figur 8E) som kan representeras av en normalfördelning (Figur 8F).

Exemplet i Figur 8 redovisar prover från samtliga områden utmed tunnelsträckningen. Proverna inom grupp 2 är inom beräkningsområdet. I nästa steg undersöks om det finns skillnader mellan grupp 2 och de övriga områdena. Om någon eller några grupper kan uteslutas upprepas stegen A-F med endast de kvarvarande värdena.



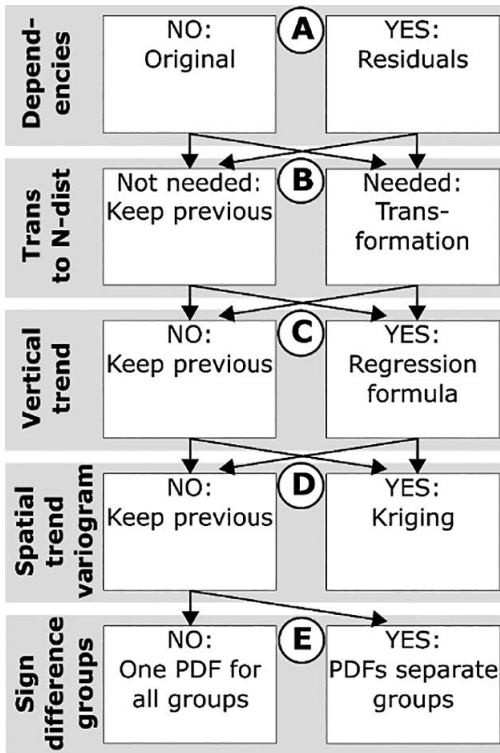
Figur 8 Steg för att transformera data för att kontrollera beroenden mellan parametrar och att data är normalfördelad. Bilden är exemplifierad för beroendet mellan σ'_v och σ'_c . Områden 1-4 framgår av Figur 11.

Utöver $OCR > 1$ introduceras kriterierna: $\sigma'_L > \sigma'_c$ och $M_0 > M_L$. Analogt med OCR undviks inkonsekventa värden i senare MC simuleringar genom att beräkningarna baseras på kvoterna σ'_L/σ'_c och M_0/M_L . Precis som med OCR subtraheras kvoten σ'_L/σ'_c med 1 för att villkora att $\sigma'_L > \sigma'_c$ i senare simuleringar. I ett sista steg transformeras kvoterna och vertikala trender undersöks analogt med exemplet för OCR.

Utöver nämnda beroenden undersöks förhållanden mellan σ'_L och M_L på samma sätt som beskrivits ovan. Den hydrauliska konduktiviteten (k) och densiteten (ρ) för lera antas i denna rapport oberoende från övriga parametrar men hanteras i övrigt på samma sätt för att undersöka trender mot djupet och homoskedastiska skillnader utmed detta.

Tungheten för den grovkorniga jorden har beräknats från andra projekt och stämmer med vad som generellt kan antas för silt och sand i Sverige (Larsson, 2008). Även denna hanteras som oberoende av övriga parametrar.

Nödvändiga steg för en lyckad datahantering och anpassning till PDF sammanfattas av Figur 9A-C. I A undersöks beroenden mellan parametrar. Om ett beroende finns används kvoten mellan parametrarna i nästa steg. I B transformeras data till normalfördelade värden såtillvida de inte redan från steg A kan beskrivas med en normalfördelning. I C undersöks vertikala trender med linjär regression. Om determinationskoefficienten R^2 är nära noll kan avsaknad av vertikal trend antas. Om trenden delvis kan beskriva variabiliteten hos en variabel (låg R^2) måste den vertikala trenden beaktas för att inte överskatta spridningen mellan de utvärderade parametervärdena. En sådan överskattning innebär också att överskattning av osäkerheterna i den senare MC-simuleringen. För de fall där R^2 måste beaktas används residualerna mellan regressionslinjen och värdena från steg B i nästkommande steg. I ett sista steg testas om värdena är normalfördelade genom residual- och normal-score plottar och Kolmogorov-Smirnov (KS) test. Ett KS-test mäter den största skillnaden mellan den anpassade fördelningen och de punktvisa datavärdena.



Figur 9 Schema för datahantering och analys innan PDFs kan skapas, från Sundell et al. (2017a).

2.9 Rumsliga skillnader och skillnader mellan grupper

Rumsliga skillnader kan beskrivas med två metoder: variogramanalys (som för borrhålen med jordlagerföljder i avsnitt 2.1) och variansanalys (ANOVA). Innan dessa metoder kan användas måste två krav vara uppfyllda: (1) normalfördelade data med samma varians och (2) att det inte finns någon (vertikal) trend. Om dessa krav inte är uppfyllda tillämpas nödvändiga transformationer enligt avsnitt 2.8.

Eftersom det i huvudsak är stora avstånd mellan provtagningspunkterna kan det antas att variogramens korrelationslängd (avståndet där en enskild undersökningsspunkt inte förbättrar informationen av värdet på den platsen i förhållande till hela datamängden) inte uppnås på dessa avstånd. Därför har variogrammetoden ej valts för vidare analys. Istället används ANOVA för att undersöka skillnader mellan grupper. I fallstudien har tre gruppindelningar undersökts: (1) prover som endast är betecknade som siLe (siltig lera) och övriga prover (innehåller främst sand och skalrester med siLe som huvudord), (2) utvärdering av provkvalitet enligt SGI information 3 (Larsson et al., 2007) samt (3) indelning i fyra delområden utmed sträckan, se Figur 11. Nollhypotesen (samma medelvärde mellan de olika grupperna) avvisas på signifikantnivån 5%. Om

nollhypotesen kan avfärdas används Bonferroni-metoden som ett *post-hoc* test för att jämföra skillnader mellan medelvärden för olika grupper. Om *post-hoc* testet visar att det finns skillnader (på 5% signifikantnivå) mellan grupper utesluts den grupp där signifikanta skillnader finns. Sedan upprepas A-C i Figur 9 för att definiera PDFs i nästkommande steg (Figur 9E). Om nollhypotesen inte kan avvisas kan inte skillnader mellan de olika grupperna urskiljas och samtliga prover antas tillhöra samma population.

2.10 Sannolikhetstäthetsfunktioner

Baserat på resultatet från steg A-E i Figur 9 kan sannolikhetstäthetsfunktioner (PDFs) för respektive parameter definieras. Om antalet prover är tillräckligt stort kan medelvärdet och standardavvikelsen användas för att definiera en normalfördelning. Om antalet prover inte är tillräckligt stort används istället t-fördelningen tillsammans med antalet frihetsgrader för proverna.

2.11 Simulering av marksättning

Från tidigare beskrivning av simulering av jordlagerföljd, grundvattennivåer, effektivspänningar och PDFs för ingående parametrar kan marksättning till följd av grundvattensänkning simuleras i en MC-modell. Simuleringssekvensen i modellen redovisas i Figur 10. I varje griddpunkt initieras simuleringen med en bergnivå (Figur 10B), och en jordlagerföljd (Figur 10C) enligt vad som redovisats i avsnitt 2.1. Sedan simuleras en grundvattennivå från de n kalibrerade modellerna enligt avsnitt 2.2 och σ'_v beräknas enligt avsnitt 2.4 för varje 0,1-meters intervall utmed djupet (Figur 10D).

Hur parametrarna simuleras i nästkommande steg beror av dess tidigare transformationer. Stegen nedan redovisar den faktiska simuleringssekvensen för data för Varberg. σ'_c (Figur 10E) beräknas genom att multiplicera σ'_v med OCR. OCR beräknas genom att först simulera ett värde från PDF som beskriver residualerna från regressionen av $\ln(\text{OCR}-1)$. Från skillnaden mellan regressionslinjen och de simulerade residualerna beräknas ett värde för $\ln(\text{OCR}-1)$ för varje vertikalt intervall. Dessa värden transformeras till OCR genom exponentialfunktionen och addition med värdet 1. Den skuggade ytan visar 90-procents konfidensintervall för observationer av OCR. Den rödsträckade linjen visar ett exempel för en simulering av OCR baserat på PDF för residualerna av $\ln(\text{OCR}-1)$.

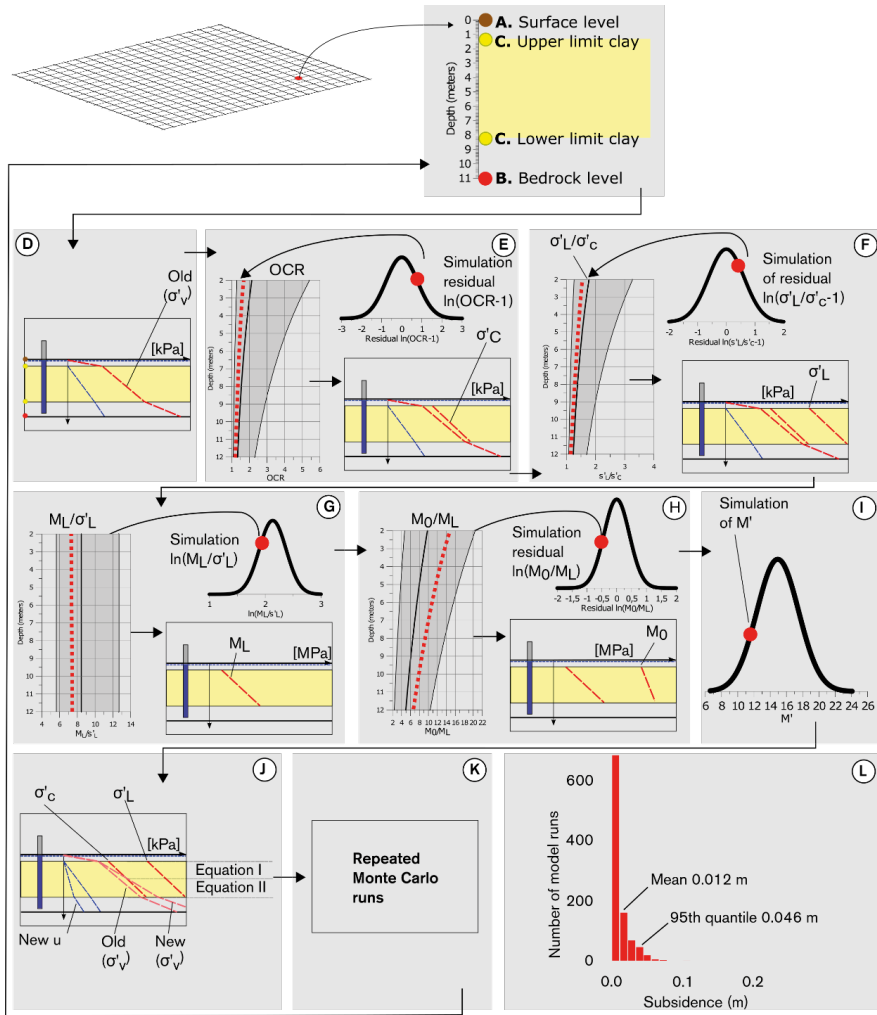
På samma sätt som ovan beräknas σ'_L i steg F genom att multiplicera σ'_c med $\ln(\sigma'_L/\sigma'_c-1)$. Denna faktor beräknas från en simulering av dess residualer och regressionsfunktionen mot djupet. I steg G beräknas M_L genom att simulera ett värde för $\ln(M_L/\sigma'_L-1)$. M_0 beräknas genom att simulera ett värde av residualen från regressionen av $\ln(M_0/M_L)$.

Tre av lerans parametrar simuleras oberoende av övriga: M' (Figur 10I), densiteten och k . För M' simuleras ett värde från dess PDF. Lerans hydrauliska konduktivitet, k ,

simuleras genom en PDF för dess 10-logaritm. På samma sätt simuleras densiteten genom en PDF för dess naturliga logaritm.

Det förändrade portrycket till följd av grundvattenpåverkan beräknas enligt avsnitt 2.5 för full tid och enligt avsnitt 2.6 för tiden, t , efter påverkan. Beroende av hur den förändrade effektivspänningen (new σ'_v i Figur 10J) förhåller sig till σ'_c och σ'_L enligt fall 1-3 i Tabell 1 väljs respektive ekvation för att beräkna marksättningen för varje 0,1-meters intervall. I Figur 10J väljs ekvation 1 i den övre delen medan ekvation 2 används i den undre delen. Slutligen approximeras sättningen för varje grid-punkt enligt trapetsmetoden i ekvation 4. Som nämnts tidigare har ytlaste så som t.ex. byggnadslaster ej inkluderats i modellen. Inte heller grundläggningstyp (så som t.ex. platta på mark eller pålgrundläggning) har beaktats.

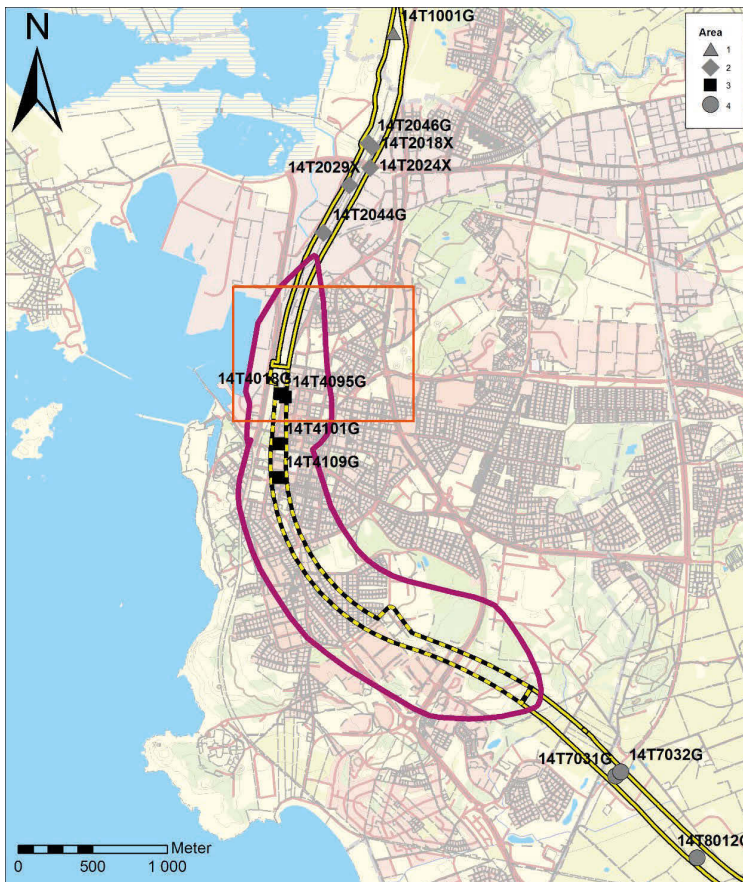
Hela simuleringssekvensen upprepas med 6500 iterationer i varje grid-punkt (Figur 10K). Dessa består av 10% av urvalet från grundvattensimuleringarna (65 av 651, se delrapport 2) och 100 simuleringar av parametervärden för var och en av dessa. Från dessa iterationer erhålls en fördelning av beräknade marksättningar i varje punkt (Figur 10L). Genom att kombinera de resulterande fördelningarna för samtliga grid-punkter kan risken för marksättning redovisas på en karta för respektive åtgärdsalternativ, se avsnitt 6.



Figur 10 Simuleringssekvens för kompressionsparametrar och marksättning, modifierad efter Sundell et al. (2017a).

3 DATAUNDERLAG

Totalt har 13 provtagningspunkter (46 provtagningsnivåer) utvärderats, se Figur 11, Figur 12 och Tabell 2. Parametervärden har hämtats från MUR Geoteknik (Hurtig et al., 2016) och sammanställning av härledda värden (Trafikverket, 2016). För CRS-försök på prover från undersökningspunkterna 14T4109G, 14T4018G och 14T4095G har härledda värden för modulen M_0 ej redovisats i MUR Geoteknik. För dessa undersökningspunkter har M_0 för indata till denna rapport beräknats som $M_0=3*M_{0,CRS}$. Den hydrauliska konduktiviteten för leran, k , har för denna rapport utvärderats vid en kompression i CRS-försöken som motsvarar σ'_c , detta för att erhålla representativa k för indata till beräkning av sättningarnas tidsberoende.



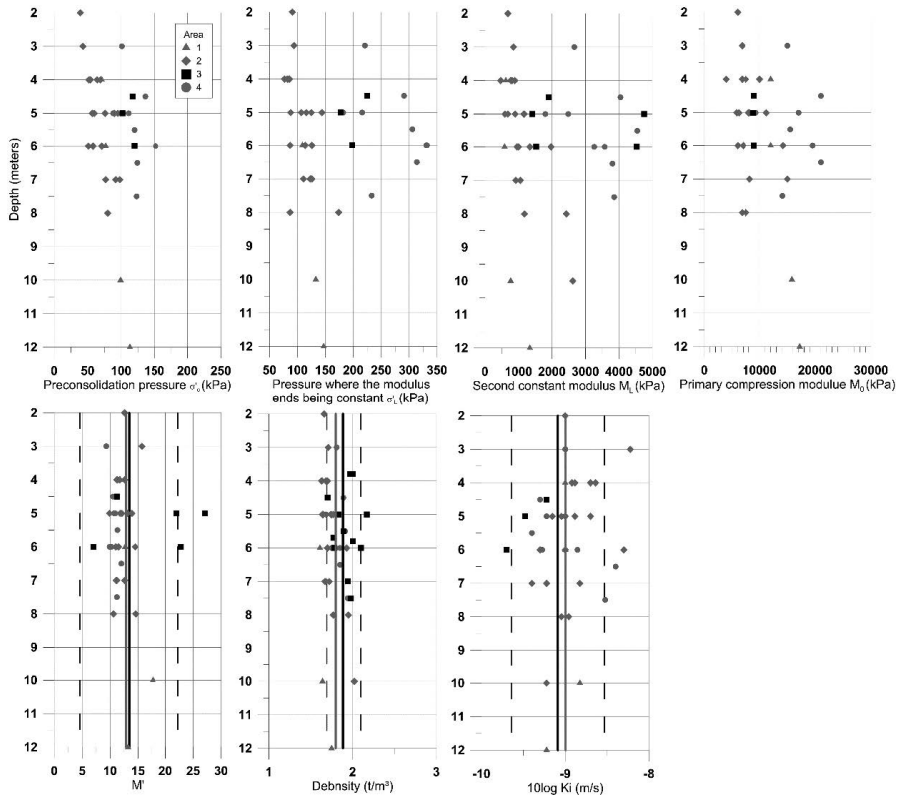
Figur 11 Provtagningsplatser för utvärderade oedometerförsök tillsammans med påverkansområde från PM hydrogeologi (lila område utmed sträckan) (Sundlöf et al., 2016) och modellområde för grundvattenmodellen (röd rektangel) (Sundell et al., 2018). Påverkansområdet från PM hydrogeologi har modifierats i senare handlingar.

Tabell 2 Parametervärden och tre gruppindelningar.

Borrhål	Djup, m	Jordart	Densitet t/m ³	Vattenkvot, w%	σ'_c , kPa	ML, kPa	σ'_L , kPa	M'	k (m/s)	M ₀ , kPa	σ'_{v_0} , kPa	OCR	Grupp Jordart	Grupp Provkvalité	Grupp område
14T1001G	4	siLe	1,64	70	71	620	82	12	1,0E-09	12000	20,9	3,40	1	1	1
14T1001G	6	siLe	1,61	66	77	581	109	13	1,0E-09	12000	33,1	2,33	1	1	1
14T1001G	10	siLe	1,64	61	99	765	133	18	1,5E-09	15800	58,7	1,69	1	1	1
14T1001G	12	siLe sa	1,75	43	113	1337	147	13	6,0E-10	17200	73,7	1,53	2	1	1
14T2018X	4	siLe	1,63	62	54	468	82	13	1,3E-09	7500	16,8	3,22	1	1	2
14T2018X	5	siLe	1,64	66	60	593	88	12	2,0E-09	8000	23,2	2,59	1	1	2
14T2018X	6	siLe	1,8	52	71	955	126	15	5,0E-10	14200	31,2	2,28	1	1	2
14T2018X	7	siLe	1,72	56	92	915	126	13	1,5E-09	15000	38,4	2,40	1	1	2
14T2018X	8	siLe sa	1,95	56		2427	174	15	9,0E-10	7500	47,9		2	3	2
14T2024X	4	siLe	1,68	57	52	890	77	12	2,0E-09	10000	32,3	1,61	1	1	2
14T2024X	5	siLe	1,65	60	76	684	107	12	9,0E-10	8200	38,8	1,96	1	2	2
14T2024X	6	siLe	1,8	54	58	1000	87	12	5,0E-09	6000	46,8	1,24	1	2	2
14T2024X	7	siLe	1,68	62	98	925	123	11	4,0E-10	8200	53,6	1,83	1	2	2
14T2029X	2	siLe_sa_sk	1,66	53	39	684	91	13	1,0E-09	6000	22,4	1,74	2	2	2
14T2029X	3	siLe_sa_sk	1,71	57	43	851	94	16	6,0E-09	6800	29,5	1,46	2	1	2
14T2029X	4	grsasiLe	1,7	53	64	811	83	11	2,3E-09	3900	36,5	1,76	2	3	2
14T2029X	5	siLe (gr)	1,75	50	90	901	125	14	1,0E-09	11200	44,0	2,05	2	2	2
14T2029X	6	siLe sa	1,93	33		1975			1,0E-09		53,3		2	3	2
14T2044G	4	siLe_sa_sk	1,69	56	69	771	86	11	1,2E-09	6800	36,9	1,87	2	2	2
14T2044G	5	siLe sa sk	1,77	51	57	1162	116	13	1,3E-09	5800	44,6	1,28	2	2	2
14T2046G	5	siLe_sa_	1,74	49	95	1170	144	9,9	7,0E-10	6200	54,4	1,75	2	3	2
14T2046G	6	siLe	1,7	55	51	1340	114	11	1,0E-09	7000	61,4	0,83	1	1	2
14T2046G	7	siLe	1,67	60	77	1054	111	11	6,0E-10	8200	68,1	1,13	1	2	2
14T2046G	8	siLe	1,77	52	80	1178	87	11	1,1E-09	6800	75,8	1,06	1	2	2
14T2046G	10	siLe sa	2,02	24		2623			6,0E-10		96,2		2	3	2
14T7031G	4,5	siLe(sa)sk	1,89	41	136	4047	291	11	5,0E-10	21000	43,1	3,15	2	2	4
14T7031G	5,5	siLe(sa)sk	1,91	41	120	4545	306	11	4,0E-10	15500	52,2	2,30	2	2	4
14T7031G	6,5	siLe sk	1,85	44	124	3809	314	12	4,0E-09	21000	58,3	2,13	2	2	4
14T7031G	7,5	siLe sk	1,94	32	123	3855	233	11	3,0E-09	14100	67,7	1,82	2	2	4
14T7032G	3	siLe	1,81	40	101	2668	221	9,3	1,0E-09	15000	23,2	4,36	1	2	4
14T7032G	5	siLe_si_sk	1,83	38	88	2484	182	11	1,0E-09	9300	39,8	2,21	2	2	4
14T7032G	6	siLe sk	1,85	33	152	3575	331	10	1,4E-09	9000	48,3	3,15	2	3	4
14T8012G	5	siLe	1,68	59	111	1802	216	11	6,0E-10	17000	44,5	2,49	1	1	4
14T8012G	6	siLe	1,75	45	120	3262	332	9,9	5,3E-10	19500	52,0	2,31	1	1	4
14T4101G	5	Sa/sasiLesk	2,17	20		4749		27			89,1		2	3	3
14T4101G	6	sasiLe le	2,1	22		4531		23			100,1		2	3	3
14T4109G	4,5	gylLe/Sa	1,7	56	117	1909	225	11	6,0E-10	9000	57,3	2,04	2	2	3
14T4018G	3,8	sisaLe		2	38						48,1		2	3	3
14T4018G	5,5	sisaLe	1,89	39							63,2		2	3	3
14T4018G	5,7	sisaLe	1,77	44							64,8		2	3	3
14T4018G	6	sisaLe	1,78	57	120	1530	198	7	2,0E-10	9000	67,1	1,79	2	2	3
14T4018G	7,5	sisaLe	1,98	32							81,8		2	3	3
14T4095G	3,8	sasiLe	1,97	33							48,5		2	3	3
14T4095G	5	sasiLe	1,83	41	102	1410	178	22	3,3E-10	8813	58,5	1,74	2	2	3
14T4095G	5,8	lesiSa		2	27						66,5		2	3	3
14T4095G	7	sisaLe	1,94	38							77,8		2	3	3

Från närliggande grundvattennivåobservationer och interpolation av grundvattennivåer, se Figur 12 i Sundell et al. (2017b) har u och σ'_v beräknats för varje provtagningspunkt och i varje nivå. Hydrostatiska förhållanden har antagits vid denna beräkning. Från dessa har sedan OCR beräknats. På 6 m djup i 14T2046G har OCR beräknats till <1 och därför uteslutits från vidare analys.

Som beskrivits i avsnitt 2.9 har tre gruppindelningar undersökts för att se om det finns skillnader mellan olika grupper med ANOVA, se de tre högra kolumnerna i Tabell 2. Den första gruppindelningen baseras på om provet endast är bedömt som siLe (grupp 1) eller om det också innehåller andra material (grupp 2). Den andra gruppindelningen (provkvalité) baseras på utvärdering av provkvalité enligt SGI Information 3 (Larsson et al., 2007) med tre klasser: God (grupp 1), Någorlunda (grupp 2) och Dålig (grupp 3). I den sista gruppindelningen har proverna delats in i fyra olika områden, se symbollegend för "Area" i Figur 11. Modelleringsområdet för grundvattenmodellen och sättningsmodellen är inom grupp 3 för den områdesvisa indelningen. Detta område kännetecknas av en bebyggd urban miljö. Område 1 och 4 kännetecknas av en obebyggd miljö. Proverna från område 2 är i huvudsak utmed det befintliga järnvägsspåret. Symbolbeteckningen för den områdesvisa indelningen framgår också i Figur 12.



Figur 12 Parametervärden plottade mot djupet under markytan. I de tre nedre graferna visar de gråmarkerade strecket medelvärdet för samtliga prover. De svartmarkerade linjerna visar medelvärde för de prover som inte kan uteslutas från område 3. De streckade linjerna visar 90-procents intervall för framtida observationer för detta område, se avsnitt 4.

4 STATISTISK ANALYS

Som beskrivet i avsnitt 2.8 har de parametrar som utvärderas från CRS-försöken transformerats för att hantera beroenden mellan dessa och för att säkerställa att de är normalfördelade. För att hantera beroendet mellan σ'_c och σ'_v , har OCR analyserats. Resultaterande parametrar från denna transformation framgår av kolumnen längst till vänster i Tabell 3.

I ett första steg undersöks om de transformerade parametrarna är beroende mot djupet genom determinationskoefficienten R^2 . De fetmarkerade värdena för denna i Tabell 3 visar en koefficient över 0,05 vilket innebär att trenden mot djupet förklarar mer än fem procent av variabiliteten för dessa parametrar. Därför har residualerna mellan parametervärdena och regressionslinjen använts i den vidare analysen för $\ln(OCR-I)$ och $\ln(\sigma'_L/\sigma'_c-I)$. Även om förklaringsgraden är relativt låg, kring 10%, innebär ändå beaktandet av denna att en del av spridningen i parametervärdena förklaras av regressionen mot djupet. Att inte beakta detta skulle innebära en överskattning av osäkerheterna i vidare simulering av marksättningar. De signifikanta residualerna framgår på den andra och tredje raden nedifrån i Tabell 3. Regressionen på den nedersta raden i Tabell 3 visar att korrelationen mellan M_L och σ'_L förklarar 85 procent av variabiliteten mellan dessa vilket visar att det är motiverat att simulera M_L från σ'_L genom $\ln(M_L/\sigma'_L)$ i nästkommande steg.

Eftersom det bara är två grupper för jordart har skillnader inom denna gruppering undersökts med T-test istället för med ANOVA. På samma sätt som i en ANOVA testas nollhypotesen (samma medelvärde mellan de olika grupperna) som kan avvisas på signifikantnivån 5%. I de tester som är markerade med "N" kan nollhypotesen inte avvisas och i de markerade med "J" kan den det. Testet visar att jordartsindelningen är signifikant för flera parametrar. Jordartsindelningen kan inte särskiljas för olika lerområden i den vidare probabilistiska modelleringen eftersom samtliga jordarter med lera som huvudord är klassat som endast en typ av lera i jordlagermodellen (Sundell et al., 2017b). Detta innebär att även om signifikanta skillnader finns så kan dessa inte särskiljas i den vidare modelleringen vilket innebär att dessa skillnader inte beaktas för vidare analys och modellering.

I ANOVA med gruppindelning efter provernas kvalité visar modulerna och lerans densitet att signifikanta skillnader finns. Provkvalitén för dessa prover är korrelerad mot provernas densitet (vilket är en parameter som kan utvärderas tillförlitligt) och densiteten är korrelerad mot jordartsindelningen. Detta innebär att provkvalitén inte endast kan härröras till handhavande i fält och laboratorium utan att de faktiska förhållandena orsakar en sämre kvalité. Mot bakgrund av detta resonemang beaktas inte skillnader i utvärderad provkvalitet i vidare analys och modellering.

Jämförelsen med ANOVA i den områdesvisa gruppindelningen visar på signifikanta skillnader mellan samtliga grupper förutom för den naturliga logaritmen av densiteten. I den vidare modelleringen beaktas område 3. Resultatet av detta test visar om något

område kan uteslutas från den population av prover som beskriver område 3, se den näst sista kolumnen i Tabell 3.

För de fall där områden kan uteslutas från den grupp som beskriver område 3 så utesluts först dessa områden. Därefter görs regressionsanalysen om med kvarvarande värden. Resultatet av R^2 för dessa framgår i den sista kolumnen i Tabell 3. Endast $\ln(M_0/M_L)$ visar på en $R^2 > 0,05$ varför regressionen endast beaktas för denna parameter förutom för $\ln(OCR-1)$ och $\ln(\sigma'_L/\sigma'_{c-1})$ där inget område kunde uteslutas och samtliga områden beaktas för den vidare analysen av område 3.

Tabell 3 Parametrar och resultat av statistisk analys

Parameter	R^2	T-test jordart	ANOVA Prov- kvalité	ANOVA Område	Post Hoc Omr - 3	R^2 POST- ANOVA omr 3
M'	0,01	N	J	0	Omr 2 kan uteslutas	0,01
$\ln(OCR-1)$	0,11	N	N	0	Inget område kan uteslutas	
$\ln(\sigma'_L/\sigma'_{c-1})$	0,10	N (0,054)	N	0	Inget område kan uteslutas	
$\ln(M_L/\sigma'_L)$	0,00	J	N	0,04	Inget område kan uteslutas	
$\ln(M_0/M_L)$	0,01	J	J	0,003	Omr 1 kan uteslutas	0,053
$10\log(K_i)$	0,02	N	N	0,05	Omr 2 kan uteslutas	0,035
$\ln(\text{Densitet})$	0,03	J	J	0,28	Omr 1 och 2 kan uteslutas	0,018
residuals $\ln(OCR-1)$		N	N	0,008	Inget område kan uteslutas	
residuals $\ln(\sigma'_L/\sigma'_{c-1})$		J (0,05)	N	0,003	Inget område kan uteslutas	
$R^2 - M_L$ och σ'_L	0,85				Inget område kan uteslutas	

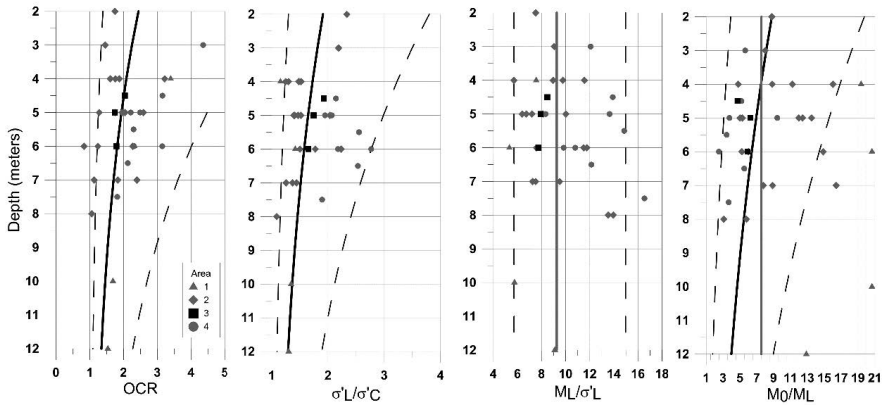
Baserat på resultatet av den statistiska analysen kan PDF för de olika parametervärdena bestämmas för den vidare simuleringen, se Tabell 4. I de fall där det finns en signifikant trend mot djupet beskriver PDF skillnaden från regressionskurvan (residual).

Residualerna beskrivs av formeln $y=a*x+b$ där y är parametervärdet, x är djupet och regressionskoefficienterna a och b framgår av Tabell 4. Samtliga simuleringar utgår från normalfördelade värden med de medelvärden och standardavvikelser som framgår av Tabell 4.

Tabell 4 PDF (Normalfördelning) och regressionskoefficienter för simulering av marksättning.

	Normalfördelning		Regression	
	Medelvärde	StdDev	b	a
Residual $\ln(\text{OCR}-1)$	0	0,80		
Regression $\ln(\text{OCR}-1)$			0,652	-0,14
Residual $\ln(\sigma' L/\sigma' c-1)$	0	0,68		
Regression $\ln(\sigma' L/\sigma' c-1)$			0,136	-0,11
$\ln(\text{ML}/\sigma' L)$	2,22	0,29		
Res $\ln(\text{Mo}/\text{ML})$	0	0,49		
Regression $\ln(\text{Mo}/\text{ML})$			2,33	-0,08
M'	13,4	5,37		
$\ln(\text{Density})$	0,63	0,07		
$10 \log K_i$	-9,1	0,34		
Tunghet grovkornig jord	19	0,924		

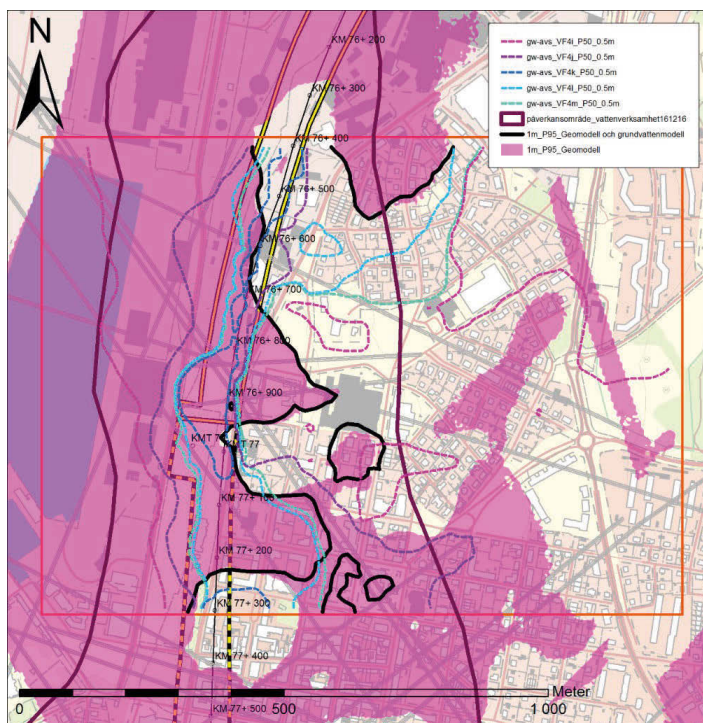
För de parametrar där beroenden mellan andra parametrar inte kan påvisas medelvärde och 90-procents intervall för framtida observationer baserat på ovan givna normalfördelningskoefficienter i de tre graferna på den nedersta raden i Figur 12. För de parametrar där beroenden finns visas medelvärden mot djupet och 90-procents intervall för framtida observationer för område 3 i Figur 13.



Figur 13 Faktorer som används för att beakta beroenden mellan parametervärden plottade mot djupet. Den gråmarkerade linjen i grafen längst till höger visar medelvärdet för samtliga prover. De svartmarkerade linjerna i samtliga grafer visar medelvärde för de prover som inte kan uteslutas från område 3. De streckade linjerna visar 90-procents intervall för framtida observationer för område 3.

5 RISKOMRÅDE FÖR MARKSÄTTNING

Resultatet av det uppdaterade riskområdet för marksättningar jämfört med det tidigare området som presenterades i delrapport 1 (Sundell et al., 2017b) framgår av Figur 14. Det tidigare området baserades på en interpolation av grundvattennivåer och det uppdaterade området på den probabilistiska grundvattenmodellen. Närmast tunnelinjen, där ett stort antal grundvattennivåobservationer finns, är de båda områdena i princip identiska. I den östra delen saknas grundvattennivåobservationer. För denna del visar den probabilistiska grundvattenmodellen är lägre grundvattennivåer jämfört med tidigare interpolation vilket medför ett mindre riskområde. Interpolationen beaktar till skillnad från grundvattenmodellen inte de förhållanden som styr grundvattenströmningen. I det östra området baseras den tidigare interpolationen på observationer i höjdområdet öster om modellområdet. Dessa observationer är på så pass stora avstånd att de inte bedöms vara representativa för det aktuella området. I och med detta bedöms det uppdaterade området vara ett mer representativt riskområde för marksättning än det tidigare (presenterat i delrapport 1).



Figur 14 Riskområde för marksättning till följd av grundvattensänkning. Den rosa ytan visar det område som presenterades i delrapport 1 (Sundell et al., 2017b) och den heldragna svarta linjen det uppdaterade området. De streckade linjerna visar gräns för simulerad 0.5 m grundvattensänkning i lager 3 för alternativ 1-5 (Sundell et al., 2018).

6 SPATIELL SIMULERING AV MARKSÄTTNING

I den tidigare redovisade simuleringen av grundvattensänkning (Sundell et al., 2018) undersöktes fem olika scenarier för tunneln och trågets utformning (beteckning inom parentes är namn på grundvattenmodelleringsfil för att bibehålla spårbarhet):

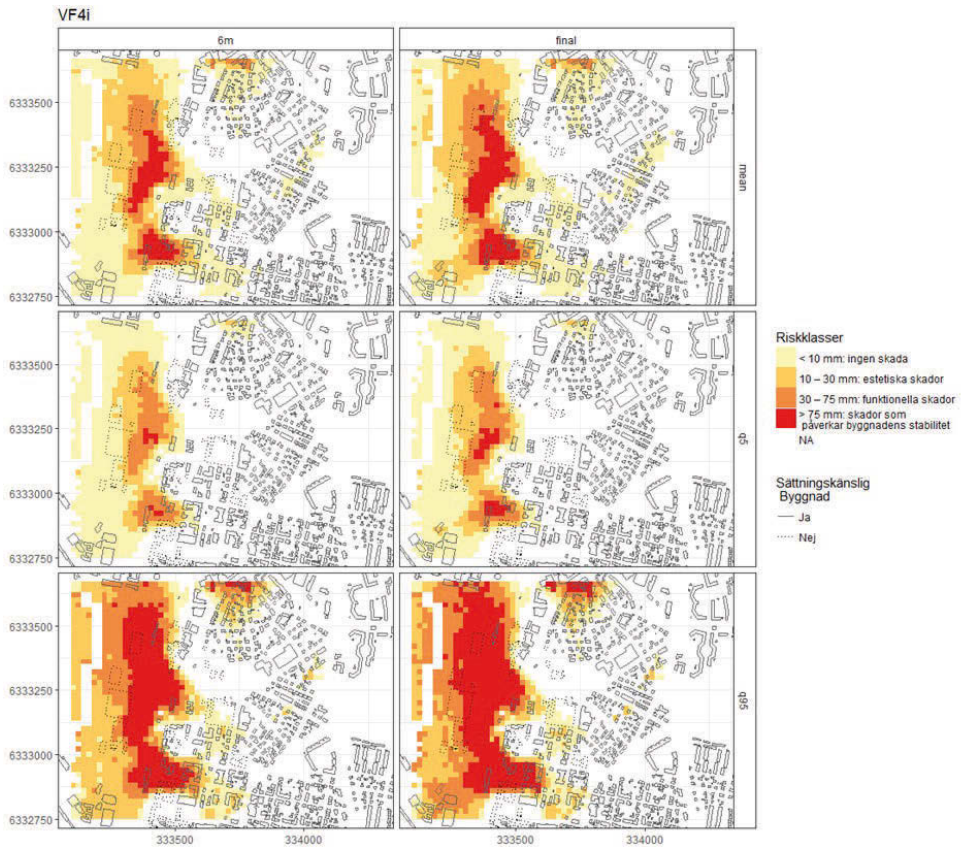
1. Helt utan tätning i schakt och tätning med högt K ($1e-6$ m/s) i sprickzoner (VF4i).
2. Tätning av schakt och sprickzoner till $K = 1e-7$ m/s (VF4j).
3. Tätning av schakt och sprickzoner till $K = 1e-8$ m/s (VF4k).
4. Tätning av schakt och sprickzoner till $K = 1e-8$ m/s med ett mer vattengenomsläppligt skikt ($K=1e-5$ m/s) i lager 5 och 6 under och vid sidan om schaktet (VF4l).
5. Tätning av schakt och sprickzoner till $K = 1e-8$ m/s med ett mer vattengenomsläppligt skikt ($K=1e-5$ m/s) i lager 1 till 6 under och vid sidan om schaktet (VF4m).

I detta avsnitt redovisas resultatet av sammankopplingen mellan dessa modeller och den probabilistiska marksättningsmodellen. Resultaten redovisas både för sex månaders och fullständig konsolidering som medelvärde, 5:e och 95:e percentil för marksättnings storlek. Byggnader som kommer att rivras eller är grundlagda på berg (Möller et al., 2016a) är klassade som ej sättningskänsliga byggnader. Övriga byggnader är klassade som sättningskänsliga. Gradindelningen av sättnings storlek är delas vid 10, 30 och 75 mm baserat på riskklasser som kommer att redovisas i projektets nästa delrapport.

Som nämnts tidigare har ytlaster så som t.ex. byggnadslaster ej inkluderats i modellen. Inte heller grundläggningstyp (så som t.ex. platta på mark eller pågrundläggning) har beaktats. Förenklingen att ej beakta ytlaster ger troligtvis en underskattning av marksättningen i de grid-punkter där permanenta ytlaster förekommer eftersom effektivspänningen i sådana fall sannolikt är större (förutsatt att dessa ej är pålade, då kan modellen istället resultera i en överskattad sättning). De beräknade sättningarnas storleksordning bedöms ändå vara rimliga för att klarlägga riskområden för marksättningar inom de intervall/riskklasser som nämnts ovan (10, 30 och 75 mm). För de fall där betydande sättningar och risk för skada bedöms kunna förekomma rekommenderas detaljerade beräkningar som beaktar byggnadernas last.

6.1 Alt 1 (VF4i) – Helt utan tätning

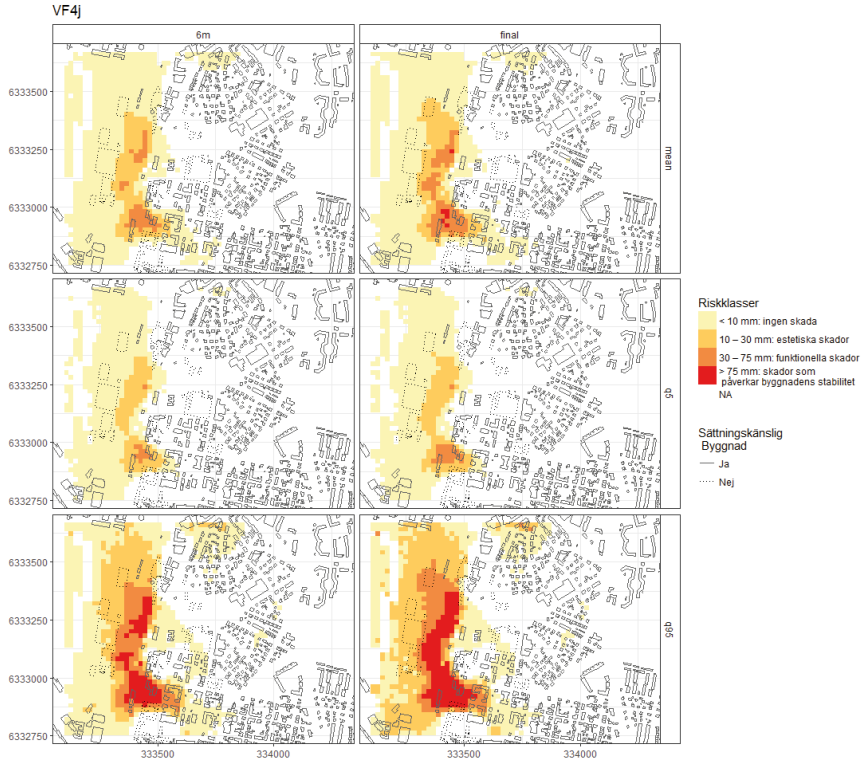
Det första alternativet resulterar i stora grundvattensänkningar över hela området. Följaktligen är detta alternativ också det som ger upphov till störst marksättningar, Figur 15. Alternativet visar vad som skulle kunna hända om planerade tätningsåtgärder inte genomförs. Simuleringen visar att större marksättningar (>30 mm) kan uppkomma inom området för ett tiotal byggnader.



Figur 15 Simulerad marksättning efter sex månader (6m) och efter fullständig konsolidering (final) för medel (mean), 5P (q5) och 95P (q95) för alternativ 1.

6.2 Alt 2 (VF4j) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-7$ m/s.

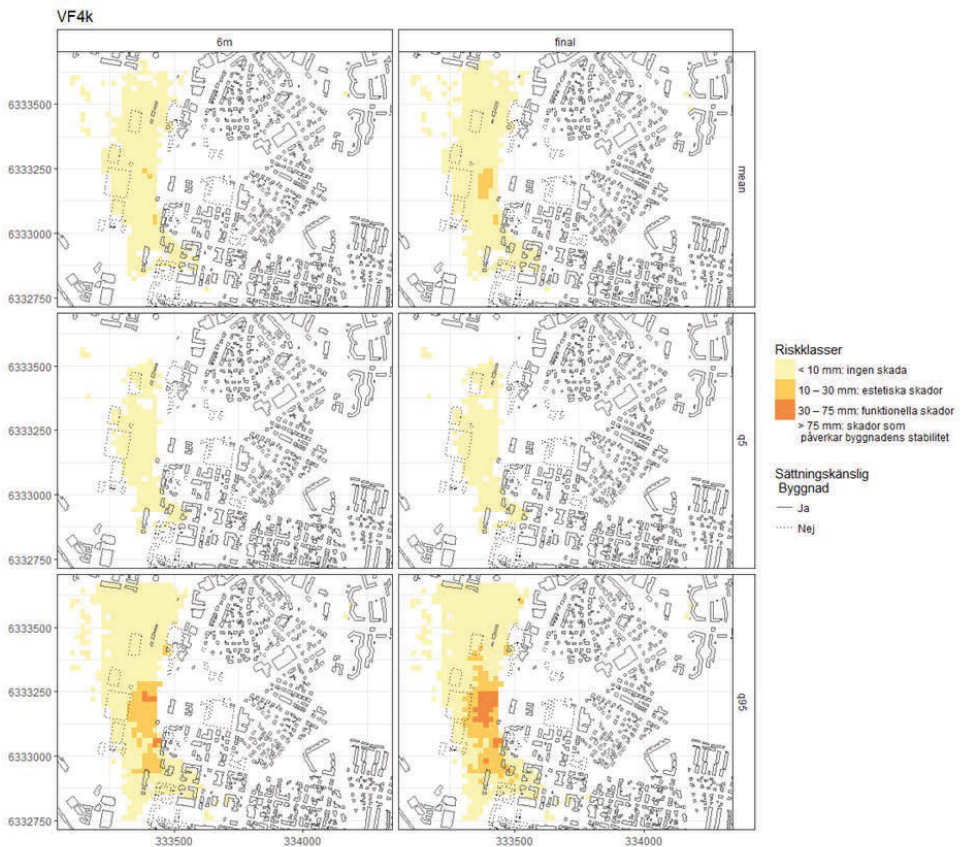
Simuleringen för alternativ 2 visar mindre marksättningar jämfört med alternativ 1, se Figur 16.



Figur 16 Simulerad marksättning efter sex månader (6m) och efter fullständig konsolidering (final) för medel (mean), 5P (q5) och 95P (q95) för alternativ 2.

6.3 Alt 3 (VF4k) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s.

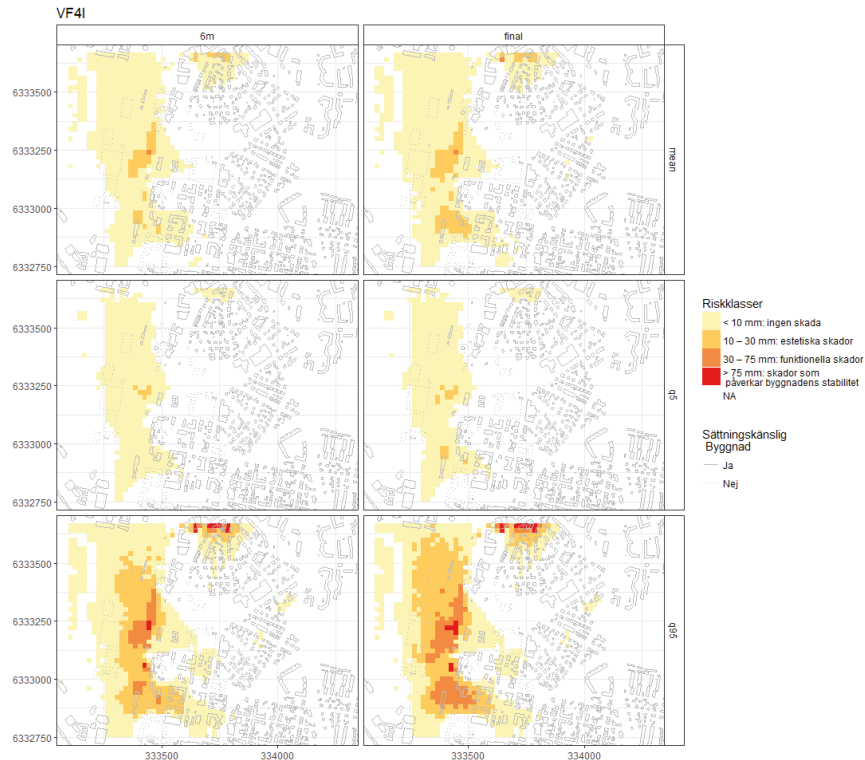
I detta scenario orsakar tätningen av tunnel och schakt en förhöjd grundvattennivå i stora delar av området öster därom då en barriär skapas för grundvattenströmningen. Detta alternativ är det som resulterar i minst marksättning, Figur 17. Eftersom kraftigt förhöjda grundvattennivåer inte är önskvärda undersöks ytterligare två alternativ med motsvarande tätning men med dränering under schakt.



Figur 17 Simulerad marksättning efter sex månader (6m) och efter fullständig konsolidering (final) för medel (mean), 5P (q5) och 95P (q95) för alternativ 3.

6.4 Alt 4 (VF4I) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under schakt.

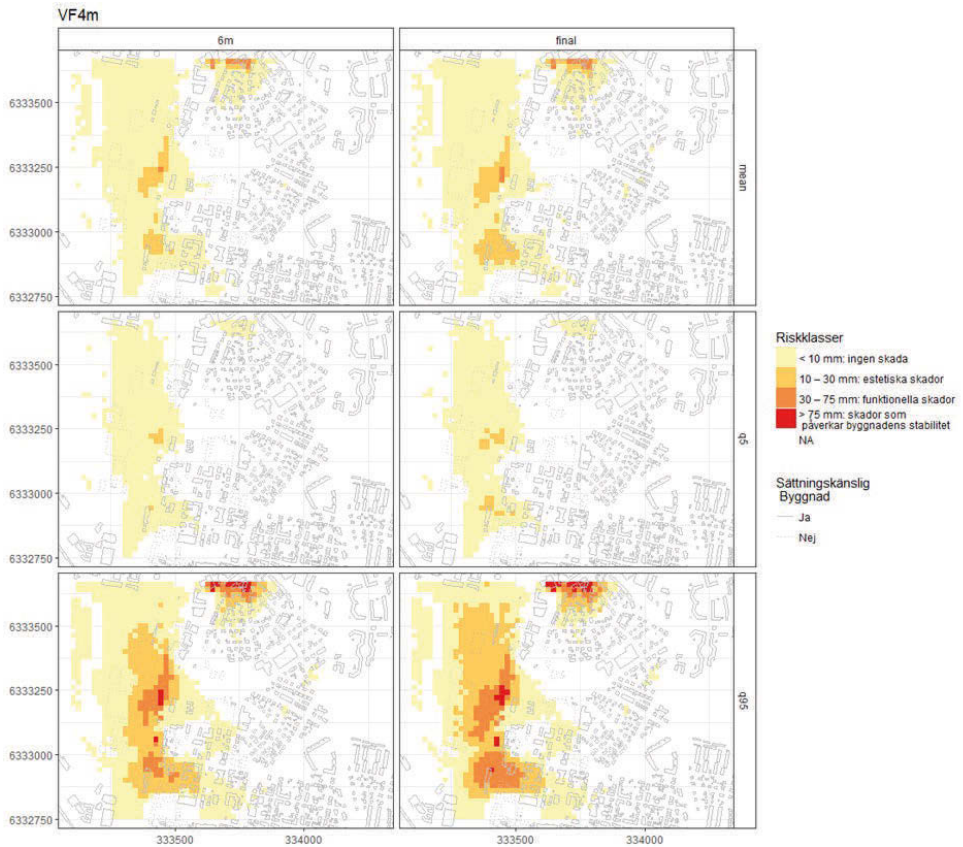
Eftersom dräneringen under schakt medför större grundvattensänkningar jämfört med alternativ 3, blir den resulterande marksättningen också större, Figur 18. Även om beräkningens medelvärde visar att sättningarna som mest blir 30 mm inom områden med byggnader visar den 95:e percentilen större sättningsbelopp främst i den norra delen av området.



Figur 18 Simulerad marksättning efter sex månader (6m) och efter fullständig konsolidering (final) för medel (mean), 5P (q5) och 95P (q95) för alternativ 4.

6.5 Alt 5 (VF4m) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=1e-8$ m/s med dränering under och vid sidan om schakt.

Alternativ 5 visar en liknande sättningsbild som alternativ 4 eftersom grundvattensänkningens storlek är snarlik över området för båda alternativen, Figur 19.



Figur 19 Simulerad marksättning efter sex månader (6m) och efter fullständig konsolidering (final) för medel (mean), 5P (q5) och 95P (q95) för alternativ 5.

7 SLUTSATS OCH DISKUSSION

Genomförd simulering för alternativ 1-5 visar ett antal områden med byggnader där sättningar som skulle kunna vara skadliga kan uppkomma. Modellen beaktar inte lasten från byggnaderna (inkl grundläggningstyp) och inte heller krypsättningar (sättning utan förändring av effektivspänningar). Modellen bedöms ändå tillräckligt signifikant för att visa på vilka områden marksättningar kan uppkomma samt storleksordningen för dessa.

För att minska risken för skada inom områden där modellen visar betydande sättningar kan flera strategier tillämpas. Osäkerheterna kring huruvida skador kan uppkomma kan minskas genom en detaljerad inventering av byggnaderna, ytterligare provtagning och baserat på denna en konventionell geoteknisk beräkning av sättningarnas storlek för enskilda byggnader. Risken för skada kan också minskas genom att åtgärder som t.ex. infiltration för att upprätthålla grundvattennivåerna genomförs. I båda fallen rekommenderas att mätningar av både grundvattennivåer och sättningsrörelser genomförs.

Behovet av åtgärder kommer vidare att bedömas i projektets nästa delrapport där risken för sättningsskador på byggnader värderas ekonomiskt.

8 REFERENSER

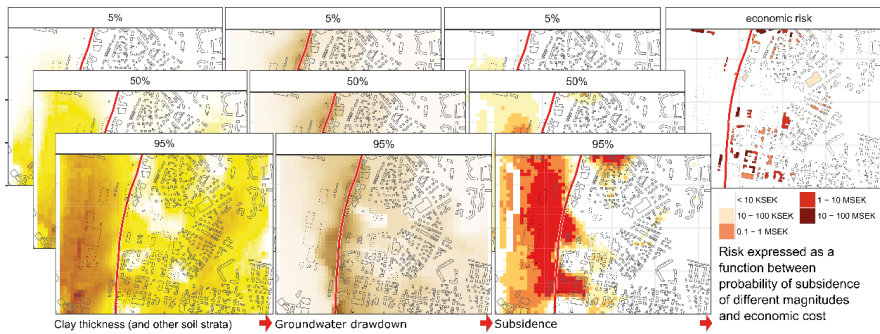
- Hurtig, K., Åkerman, J., Nilsson, L., Johansson, A., Seger, H., Karlsson, H., & Berhe, M. (2016). *BILAGA G8 TILLHÖRANDE MARKTEKNISK UNDERSÖKNINGSRAPPORT, MUR Varbergstunneln, Västkustbanan, Varberg-Hamra*. (101107-08-081-001_BilagaG8). Göteborg: Trafikverket Retrieved from <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Halland/projekt-i-hallands-lan/Varberg-dubbelspar-i-tunnel-och-resecentrum/Dokument/>.
- Larsson, R. (2008). *Jords Egenskaper*. Linköping: Swedish Geotechnical Institute Retrieved from <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>
- Larsson, R., & Sällfors, G. (1981). Beräkningar av sättningar i lera. [Calculation of settlement in clay]. *Väg- och vattenbyggaren*(3), 39-42.
- Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P.-E., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord*. Linköping: Swedish Geotechnical Institute Retrieved from <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i3.pdf>
- Möller, H., Hall, A., Nilsson, L., & Tremblay, M. (2016a). *PM UTREDNING SÄTTNINGAR I FASTIGHETER Varbergstunneln, Västkustbanan, Varberg-Hamra*. (101107-08-025-001). Göteborg Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/3932c059cdf44808aa232bd8259c52cc/101107_08_025_001.pdf.
- Möller, H., Johansson, A., Karlsson, P., Nilsson, L., Kärrlind, B., Karlsson, J., & Tremblay, M. (2016b). *BERÄKNINGS-PM GEOTEKNIK Varbergstunneln, Västkustbanan, Varberg-Hamra*. (101107-08-025-002). Göteborg: Trafikverket Retrieved from https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Privat/Projekt/Varbergstunneln/systemhandedling_101107.zip.
- Sundell, J., Aronsson, S., & Linderholm, K. (2013). *PM Planredovisade sättningar till följd av ev gv-sänkning i Förbifart Stockholm-projektet* Trafikverket Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/8ee802f438714e0da9d481dac339dc7d/provningar/mmd-mars-2013/gvb_bilaga_9_pm-planredovisade-sattningar-201303.pdf
- Sundell, J., & Haaf, E. (2015). *City Link etapp 2 - PM Riskanalys marksättningar Svenska Kraftnät*
- Sundell, J., Haaf, E., Norberg, T., Alén, C., Karlsson, M., & Rosén, L. (2017a). Risk Mapping of Groundwater-Drawdown-Induced Land Subsidence in Heterogeneous Soils on Large Areas. *Risk Analysis*, n/a-n/a. doi:10.1111/risa.12890
- Sundell, J., Rosén, L., & Haaf, E. (2017b). *Metodbeskrivning av probabilistisk modell för berg-, jordlager och grundvattennivåer - Varbergstunneln*. Göteborg: Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology
- Sundell, J., Rosén, L., & Haaf, E. (2018). *Invers probabilistisk modellering av förändrade grundvattennivåer - Varbergstunneln*. Göteborg: Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology

- Sundlöf, B., Martinsson, S., Simonsson, D., Åkesson, M., & Aneljung, M. (2016). *Projekterings-PM Hydrogeologi*. (101107-08-025-250). Göteborg: Trafikverket.
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*: Chapman And Hall, Limited.; New York.
- Terzaghi, K. (1943). *Theory of Consolidation*: Wiley Online Library.
- Trafikverket. (2016). *BILAGA G3 TILLHÖRANDE MARKTEKNISK UNDERSÖKNINGSRAPPORT, MUR Varbergstunneln, Västkustbanan, Varberg-Hamra*. (101107-08-081-001_BilagaG3). Göteborg: Trafikverket
Retrieved from <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Halland/projekt-i-hallands-lan/Varberg-dubbelspar-i-tunnel-och-resecentrum/Dokument/>.

DEL 4

METODBESKRIVNING AV RISKBERÄKNING OCH RISKVÄRDERING
AV MARKSÄTTNING VID GRUNDVATTENSÄNKNING

VARBERGSTUNNELN



INNEHÅLL

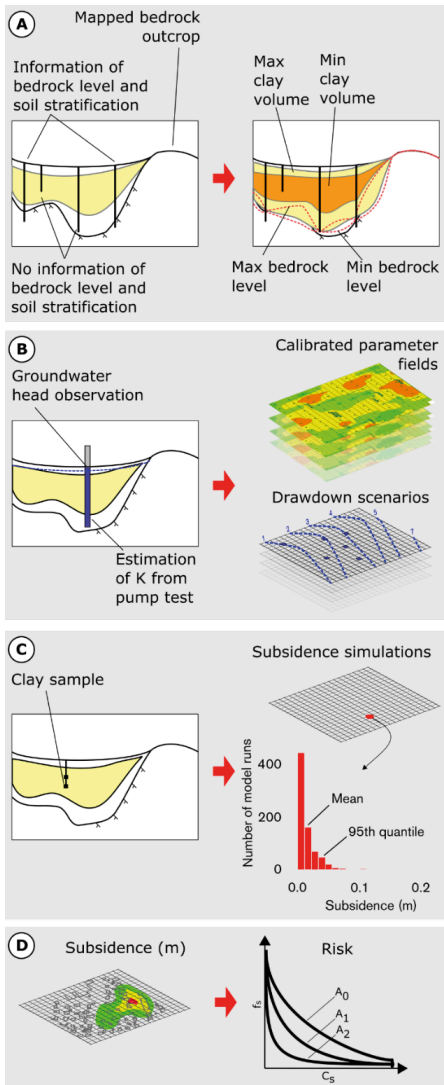
1	Inledning	145
2	Samband mellan sättning och skada	147
3	Samband mellan skada och kostnad.....	151
4	Modell för riskberäkning	155
5	Resultat	159
6	Referenser	163

1 INLEDNING

I den första delen redovisades en probabilistisk modell för jordlager och bergnivåer inom avrinningsområdet för Varbergstunneln (Sundell et al., 2017). Modellen i det första steget har använts för att skapa en geometri för jord och berg för grundvattenmodellen och sättningsberäkningarna (Figur 1A). I den andra delen (Sundell et al., 2018a) redovisades en probabilistisk grundvattenmodellering som beaktar möjliga utfall av ett antal scenarier för design av tätning och dränering kring tunneln (Figur 1B). Modellen i det andra steget används för att beräkna portrycksförhållanden innan och efter grundvattenpåverkan till följd av Varbergstunneln. I den tredje delen (Sundell et al., 2018b) kombineras de probabilistiska modellerna för jordlager, bergnivå, grundvattennivå och grundvattensänkning med sannolikhetsfördelningar av lerans kompressionsegenskaper för att simulera marksättningens storlek probabilistiskt. Sättningsberäkningarna baseras på en endimensionell elasto-plastisk kompressionsmodell (Larsson & Sällfors, 1981). Från resulterande simuleringar erhålls sannolikhetsfördelningar för marksättningens storlek för samtliga beräkningspunkter. Baserat på dessa fördelningar kan sannolikheten för en marksättning av en viss storlek på en viss plats beräknas. Dessa beräkningar redovisas både efter fullständig konsolidering samt efter ett år från dess att grundvattenpåverkan initierats (Figur 1C).

Konsekvensen av en marksättning beror av hur skadeobjektet (byggnaden, anläggningen eller markytan) skadas och vilka kostnader skadan medför. I denna delrapport presenterar vi en metod där konsekvensen av en marksättning av en viss storlek bedöms ekonomiskt. Metodiken baseras på en litteraturstudie av relationen mellan sättningsbelopp och skadeomfattning tillsammans med en genomgång av svenska rättsfall där sättningsskador har reglerats ekonomiskt. Genom att sammankoppla de beräknade sättningsbeloppen i delrapport tre med skadeobjekten inom modellområdet för Varbergstunneln kan den förväntade ekonomiska konsekvensen av marksättning till följd av grundvattensänkning beräknas. Resultatet erhålls som sannolikhetsfördelningar för skadekostnadens storlek både för varje skadeobjekt och för varje alternativt scenario av design och tätning av tunneln. Dessa redovisas sedan som risk uttryckt som en funktion av sannolikheten för skada och kostnad i kartor för varje åtgärdsalternativ. Genom dessa kan områden med hög respektive låg risk identifieras för varje alternativ. I ett andra steg definieras ett alternativ som noll-alternativet för att beräkna nyttan av övriga alternativ genom principen för kostnads-nyttoanalys (Figur 1D).

Det övergripande syftet med denna del är att beräkna vilka ekonomiska konsekvenser marksättning till följd av grundvattensänkning kan medföra samt att identifiera nyttan av olika åtgärdsalternativ relativt ett nollalternativ.

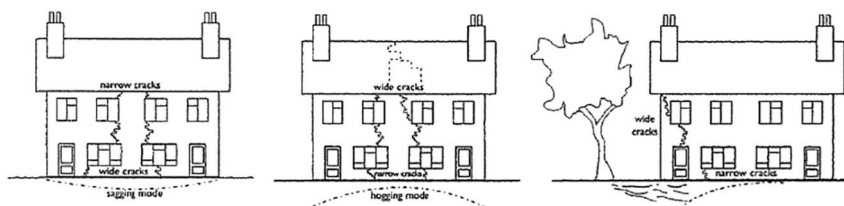


Figur 1 En kopplad modell för probabilistisk modellering av risk för grundvattensänkning och sättningsskador. Den första delen (A) modellerar jordlagerföljder och bergnivåer, den andra delen (B) modellerar grundvattensänkning, den tredje delen (C) modellerar marksättning och den sista delen (D) risk som en funktion mellan ekonomisk kostnad (C_s) och sannolikheten för skada i en viss omfattning (f_s) för olika åtgärdsalternativ (A_0 , A_1 , A_2).

2 SAMBAND MELLAN SÄTTNING OCH SKADA

I detta avsnitt presenteras en litteraturoversikt om sambandet mellan marksättnings storlek och skador på byggnader. Andra typer av skadeobjekt såsom vägar och markförlagda ledningar omfattas inte. Omfattningen av sättningskador beror dels av sättnings storlek men också av hur skadeobjektet svarar på sättningen. Hur objektet svarar styrs till stor del av dess konstruktion inklusive dess grundläggning. Som exempel är en byggnad med ytlig grundläggning ofta mer känslig än en byggnad med en förstärkt betonggrundläggning på en djupare nivå (Cooper, 2008). Vidare är murade tegelbyggnader ofta mer känsliga än armerade betongkonstruktioner och långa byggnader har större sannolikhet att skadas av en marksättning än korta (Karlsrud, 2015). Oavsett om en byggnad är konstruerad för att klara en viss rörelse kan den skadas om sättningen eller sidorörelsen är större än vad den är designad för.

En skada innebär ofta att sprickor uppkommer på byggnaden. Generellt kan sprickbildningens utseende kopplas mot tre typer av deformationer (Bonshor & Bonshor, 1996), se Figur 1. I den första typen sker huvuddelen av deformationerna i byggnadens mitt så att vida sprickor uppkommer i byggnadens botten och smalare sprickor högre upp i byggnaden. I den andra typen sker deformationerna främst på byggnadens sidor så att smala sprickor uppkommer i byggnadens botten och större sprickor högre upp i byggnaden. Det tredje sättet innebär en lokal deformation vid någon del sidorna på en byggnad vilket medför en liknande sprickbildning som för den andra typen men endast utmed denna sida. Dessa skadebildningar kan på samma byggnad förekomma var för sig eller tillsammans.



Figur 2 Tre fall av deformationssätt från vänster till höger: Sagging (nedåbuktande i mitten), hogging (nedåbuktande på sidorna) och lokal deformation.

Omfattningen av sprickbildningen innebär konsekvenser av olika grad, från mindre estetiska skador, till en mer omfattande sprickbildning som påverkar byggnadens funktion och till sist en så pass allvarlig sprickbildning som kan orsaka att byggnaden kollapsar. För att avgöra hur stor konsekvensen blir måste sättningsrörelsen i byggnaden kopplas mot skadan. Sättningsrörelsen kan mätas på flera sätt såsom: sättnings storlek (nedåtriktad rörelse), relativ sättning (största skillnaden i sättningsbelopp mellan två punkter i en byggnad), snedsättning eller differentialsättning (största skillnaden i sättningsbelopp mellan två punkter delat med byggnadens längd), byggnadens rotation (från dess vertikala axel), vinkeländring (största vinkeln mellan flera punkter där

sättning har skett) samt förhållandet mellan horisontell förflyttning och töjning (Boscardin & Cording, 1989; Korff, 2013; Wroth & Burland, 1974).

Litteratursammanställningar där observerade skador jämförs med sättningsrörelser presenteras i t.ex. Boone (1996) och Son and Cording (2005). Från dessa jämförelser kan skadekategorier kopplas mot kvantitativa sättningsbelopp. En vanligt förekommande angiven undre gräns för sprickbildning är vid differentialsättningar som motsvarar 1/500 (Bjerrum, 1967; Rankin, 1988; Skempton & Macdonald, 1956; Son & Cording, 2005). I Eurocode (European Committee for Standardization, 1997) anges den undre gränsen för sprickbildning som relativ rotation där en rotation mindre än 1/500 är acceptabel för många byggnader. I miljöprövningen för Citytunnelprojektet i Malmö angavs att differentialsättningarna för ett antal byggnader inte ska överstiga 1/500 som riktvärde, se Miljööverdomstolens dom M 487-04, 2004. I Västlänkens miljöprövning anger domen inga faktiska sättningsmått utan att "*Viss negativ påverkan från projektet kan inte uteslutas och måste också kunna accepteras. Verksamheten får dock inte leda till mer omfattande skador.*", se Mark- och miljödomstolen vid Vänersborgs Tingsrätt dom M 638-16, 2018.

Hur stor differentialsättningen eller rotationen blir beror av en mängd samverkande faktorer såsom byggnadens grundläggningsmetod, stomkonstruktion, om byggnaden är sammankopplad med andra byggnader eller ej, om jordlager av olika mäktigheter förekommer och hur grundvattennivåer innan respektive efter grundvattensänkning orsakar en variabilitet i portryck och portrycksminskning inom lerlagret under byggnaden. Om detaljerad information kring dessa faktorer finns tillgänglig kan även andra sättningsrörelser än de vertikala beräknas för byggnaden, se exempel i t.ex. Korff (2013). Sättningsberäkningarna i delrapport 3 beräknar dock endast faktiska sättningsbelopp och inte andra sättningsrörelser. Därför är det nödvändigt att skapa ett samband mellan den totala sättningen och de differential- och rotationsrörelser som gör att sprickor uppkommer. Om en sättning sker jämt över en byggnad och byggnadens grundläggning och anslutning av serviser är dimensionerade för detta behöver en större sättning inte orsaka någon skada. Ofta innebär dock en större absolutsättning också en rörelse som innebär en skada. Bjerrum (1963) anger ett empiriskt samband mellan absolutsättning och relativ sättning där den relativa sättningen är ungefär hälften av absolutsättningen. Rankin (1988) och Son and Cording (2005) anger den undre gränsen för att någon skada ska uppkomma till 10 mm förutsatt att differentialsättningen under någon del av byggnaden är större än 1/500. Chiochio et al. (1997) anger en undre gräns för när restaureringsåtgärder av ytskikt kan vara nödvändiga till sättningar om 20 mm (differentialsättningar om ca 1/300). I Eurocode anges att ett sättningsbelopp mindre än 50 mm bör vara acceptabelt för normala byggnader med fristående grundläggning (European Committee for Standardization, 1997). För Citybanan i Malmö angavs att sättningarna för ett antal byggnader inte ska överstiga 20 mm som riktvärde, se Miljööverdomstolens dom M 487-04, 2004. För Varbergstunnelns tidigare utredning om sättningar i fastigheter har en gräns på 10 mm ansatts som gränsvärde för skadliga

sättningar för plattgrundlagda byggnader och en gräns på 5 mm för stödpålade byggnader (Möller et al., 2016).

Ovan nämnda gränsvärden för när en skada kan inträffa beaktar den totala rörelsen för byggnaden och inte endast den tillkommande rörelsen som en grundvattensänkningsinitierad marksättning kan medföra. För en byggnad som redan är skadad kan endast en mindre rörelse förvärra situationen så att ytterligare skador uppstår. Inventerade byggnader inom Varberg visar dock att ytterst få sättningsskador har påträffats (Möller et al., 2016) varför ovan nämnda gränsvärden bör kunna användas för den vidare bedömningen.

Skadeomfattningen styrs inte endast av det undre gränsvärdet utan mer omfattande sättningsrörelser ger generellt mer skador. Chiochio et al. (1997) anger att sättningar upp till 30 mm som en övre gräns för restaureringsåtgärder av ytskikt och sättningar större än 100 mm (differentialsättning om 1/250) innebär restaureringsåtgärder av byggnadens konstruktion. Rankin (1988) och Son and Cording (2005) anger att motsvarande åtgärder kan behövas vid sättningar större än 50 mm (differentialsättning om 1/200). Gränsen för mer omfattande skador som innebär att byggnaden kan behöva evakueras anges i Chiochio et al. (1997) till 150 mm (differentialsättning om 1/140). Motsvarande gräns för när strukturella skador i byggnaden kan förväntas anges i Rankin (1988) till sättningar större än 75 mm (differentialsättningar om 1/150).

Gradindelningen för sättningars och skadors omfattning kan göras i flera steg. En omfattande jämförelse mellan flera mått för att klassa skador och sättningsrörelser finns sammanställd i Cooper (2008). Generellt kan skador delas in i tre breda kategorier: estetiska (1), funktionella (2) och skador som påverkar byggnadens stabilitet (3) (Driscoll, 1995). Baserat på ovanstående beskrivning används i denna rapport följande mått för absolutsättning för dessa tre kategorier:

- <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)

3 SAMBAND MELLAN SKADA OCH KOSTNAD

Skadekostnader för marksättningar kan delas in i direkta och indirekta kostnader. De direkta kostnaderna innefattar kostnader för att reparera skadan såsom att sprickor lagas vid mer lindriga skador till att fastigheten repareras och grundförstärks för mer allvarliga skador. Dessa kostnader kan värderas *ex-post* vilket innebär att kostnaden för en specifik skada är känd men att värderingen sker som om att skadan redan har inträffat. Sådana kostnader kan värderas från historiska uppgifter av reparationsarbeten. De indirekta kostnaderna kan t.ex. innebära att projektet försenas, ett lägre marknadsvärde för byggnaden, och att ägaren eller de som nyttjar fastigheten drabbas av olägenheter. De indirekta kostnaderna är mer svåra att kvantifiera än de direkta vilket innebär att en *ex-ante* värdering är nödvändig. *Ex-ante* innebär en värdering av ett utfall som inte är känt. En sådan värdering kan genomföras genom t.ex. betalningsviljestudier av vad de som drabbas är villiga att betala för att undvika besvär med sättningskador. Detaljerad information kring olika värderingsmetoder presenteras i exempelvis Boardman et al. (2011).

Det finns många exempel där grundvattensänknings har orsakat omfattande sättningar och skador, exempelvis Shanghai (Xue et al., 2005), Mexico City (Ortega-Guerrero et al., 1999), Bangkok (Phien-wej et al., 2006), Las Vegas (Burbey, 2002) men också i de skandinaviska städerna Stockholm, Göteborg och Oslo (Karlsrud, 1999; Olofsson, 1994). I de flesta studier saknas detaljerade uppgifter om skadekostnaderna utan kvalitativa termer som att kostnaden är "omfattande" eller "enorm" används ofta. Cooper (2008) anger att skadekostnader till följd av marksättningar (ej enbart initierade av grundvattensänknings) i Storbritannien uppgår till storleksordningen £500 miljoner per år. Lindskoug and Nilsson (1974) anger att skadekostnaden till följd av grundvattensänkning och pålastning i två småhusområden i Stockholm orsakade återställningskostnader till omkring 50% av husens värde.

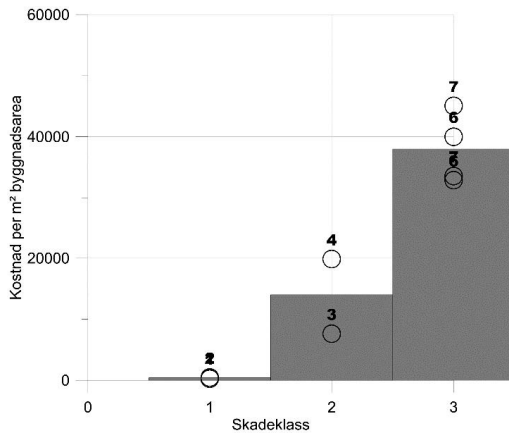
För att skapa en mer detaljerad och uppdaterad bild om skadekostnader för enskilda byggnader och skadans omfattning har ett antal rättsfall gått igenom tillsammans med andra uppgifter om skadekostnader. I den lindrigare kategorin med estetiska skador (klass 1) har också skador som inte är orsakade av sättningskador beaktats men som innebär en liknande typ av åtgärd. Vid bedömning av klasstillhörighet har skadans omfattning beaktats framför det faktiska sättningsbeloppet.

1. *Klass 1: Skador på äldre flerbostadshus i sten till följd av asfalteringsarbeten*
Mark- och miljööverdomstolen M 6128-16 (2017-05-11).
Skadeobjekt: Äldre flerbostadshus i sten (byggår 1876) i fyra våningar med källare. Boarea om 1133 m².
Skada: Invändiga och utvändiga sprickor i byggnaden.
Ersättning: 301 500 kr för lagning av sprickor och målning av fasadsockel.
2. *Klass 1: Fasadskador till följd av vinterväghållning*
Mark- och miljööverdomstolen M 10089-16 (2017-10-03).

- Skadeobjekt: Bostadshus med tegelfasader.
 Skada: Fasadskador såsom eroderade fogar, sprickor, rostangrepp och missfärgningar.
 Ersättning: 90 000 kr för att åtgärda skadorna.
3. *Klass 2: Sättningsskador till följd av grundvattensänkning*
 Miljööverdomstolen MÖD 2008:1 (2008-01-10).
 Skadeobjekt: Bostadshus från 1940-talet med källare, ej pålad, boastadsarea om 197 m².
 Skada: Sprickbildning i fastigheten och dess grundläggning till följd av sättningar om ca 60 mm.
 Ersättning: Skadestånd om 1 500 000 kr för grundförstärkning, reparation av fastighet och återställande av tomt.
4. *Klass 2: Sättningsskador till följd av markutfyllnad*
 Hovrätten för Västra Sveriges dom 2013-12-20 i mål T 4719/12
 Skadeobjekt: Bostadshus från 2000-talet, bostadsarea om 126 m².
 Skada: 200 mm snedsättning från ena änden av huset till den andra. Dörrar som smäller igen, vissa dörrar går inte att stänga eller öppna.
 Ersättning: Skadestånd om 2 500 000.
5. *Klass 2/3: Ersättning för att tidigarelägga framtida grundförstärkning*
 Mark- och miljööverdomstolen F 10024-12 (2013-06-20).
 Skadeobjekt: Flerbostadshus i sten och tegel från 1908. Area om 2857 m².
 Byggnadsarea om ca 634 m².
 Skada: Ersättning för att tidigarelägga framtida grundförstärkning till följd av att grannfastigheten måste grundförstärkas. Eftersom fastigheterna är sammankopplade kommer sättningstakten att bli ojämn av denna åtgärd vilket framtvingar tidigareläggningen. Sedan tidigare har fastigheten satt sig 1,5 m vilket har medfört mindre sprickor.
 Ersättning: Ersättning om 2 200 000 kr för att tidigarelägga en grundförstärkning i 15 år som kommer att kosta ca 12 000 000 kr.
6. *Klass 3: Utredning av kostnader för att renovera eller återuppbygga sättningsskadad fastighet*
 Teknisk utredning (Jönsson & Ahlström, 2015)
 Skadeobjekt: Tegelhus i tre våningar med källare, 900m², byggår 1850.
 Skada: Sättningsskador om 30-40 mm under bygget med Götatunneln i Göteborg, sedan sättningar om 2 mm/år. Invändiga och utvändiga sprickor.
 Kostnad: Kostnad för att renovera är beräknat till 29 600 000 kr (32 900 kr/m²).
 Kostnad för att riva och bygga nytt är beräknat till 36 000 000 kr (40 000 kr/m²).

7. Som vidare information till *klass 3* var år 2016 bruttoproduktionskostnaden per kvm bostadsarea för gruppbyggda småhus i genomsnitt 33 500 kr/m² för hela Sverige. Motsvarande kostnad för flerbostadshus och lägenhetsarea var 45 000 kr/m² (Statistiska Centralbyrån, 2017).

Genom att gruppera fallen ovan i respektive skadeklass kan skadekostnaden inom varje klass undersökas. Skadekostnaden per kvadratmeter bruttoarea och skadeklass för de sju olika fallen (förutom fall 5 som har uteslutits då denna avser en skadeförebyggande åtgärd) är redovisade som ringar i Figur 2. Baserat på denna indelning har skadekostnaden per kvadratmeter bruttoarea bedömts till 400, 14000 respektive 38000 kr som medelvärde för klass 1, 2 och 3. Dessa värden antas gälla för flerbostadshus, småhus, kontorsbyggnader men inte för enklare byggnader såsom lagerlokaler. Inom hamnområdet finns flera lagerbyggnader. Dessa kommer dock att rivras och är därför inte beaktade i beräkningen.



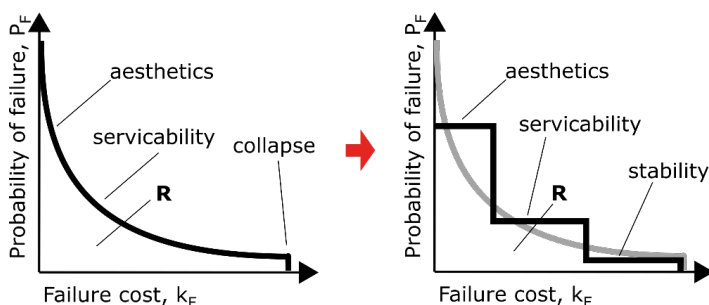
Figur 3 Skadekostnad per klass från fall 1,2,3,4,6 och 7 (ringar) respektive bedömd skadekostnad per klass (staplar).

4 MODELL FÖR RISKBERÄKNING

I delrapport 3 beräknas sannolikheten för en marksättning av en viss storlek inom det i denna rapport redovisade modellområdet. I nästa steg kan den ekonomiska risken av sättningsskador beräknas. Genom att kombinera sannolikhetstäthetsfördelningarna av sättningens storlek, f_s , från delrapport 3 med en funktion som beskriver de ekonomiska kostnaderna av en marksättning, C_s , beräknas den ekonomiska risken, R_s :

$$R_s = \int C_s f_s ds$$

Detta samband kan uttryckas som en kontinuerlig funktion där en gradvis ökning av sättningens storlek också ger en successiv ökning av skadans omfattning och kostnaden för att åtgärda denna, se den vänstra delen av Figur 3. Sambandet kan också förenklas till en stegvis funktion där varje skadekategori är associerad med en kostnad och sannolikheten för att sättningen tillhör en viss kategori beräknas, se den högra delen av Figur 3.



Figur 4 Sambandet mellan sannolikhet för skada av en viss grad (P_f) och den relaterade skadekostnaden. Den vänstra bilden uttrycker sambandet som en kontinuerlig funktion medans den högra bilden som en stegvis funktion. Risken utgör integralen av sambandet, dvs. ytan under respektive linje.

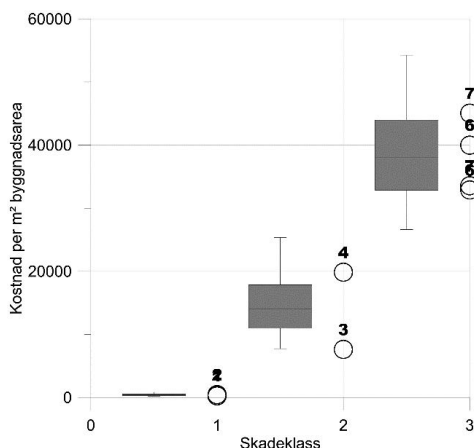
Oavsett om sambandet uttrycks som en kontinuerlig eller stegvis funktion så styrs det dels av det beräknade sättningsbeloppet och dels av de byggnadsspecifika förutsättningarna. I byggnadsinventeringen för Varbergstunneln beskrivs grundläggningen som plattgrundlagd (indelat i olika klasser beroende av underliggande jordlager), pålad till berg eller okänd grundläggning (Möller et al., 2016). Samtliga dessa grundläggningstyper kan skadas av en grundvattensänkning, även de pålgrundlagda eftersom sättningen orsakar påhängslaster. Exempel på skador på pålade byggnader med bland annat knäckta pålar till följd av grundvattensänkningar sakade sättningar finns dokumenterade i Lindskoug and Nilsson (1974). Eftersom en detaljerad inventering och beräkning av enskilda byggnader saknas måste sambandet mellan sättning och skada uttryckas som en generell modell. Om resultatet skulle visa att någon byggnad skulle vara utsatt för en betydande risk för skadekostnader kan i sådana fall en detaljerad inventering och analys av byggnadens känslighet genomföras.

Såsom tidigare redogörelse av sambanden mellan sättning, skada och kostnad beskriver så förekommer betydande osäkerheter i samtliga dessa samband. Eftersom urvalet av skadekostnadsuppgifter är litet har osäkerheterna i kostnader inom respektive skadekategori klassats genom bedömningar baserat på tillgängliga uppgifter.

Skadekostnaderna beskrivs som kostnad per kvadratmeter bruttoarea. Bedömningen av osäkerheterna baseras på att en lognormalfördelning antas representativ för kostnaderna inom varje klass. Medelvärdet bestäms av vad som redovisats tidigare, dvs, 400, 14000 respektive 38000 kr/m² bruttoarea för respektive klass. För varje klass bedöms sedan ett högsta rimligt för skadekostnaden. Detta högsta rimliga värde antas representera 95:e percentilen, dvs att det verkliga värdet med 95 % sannolikhet inte överskrider detta rimliga högsta värde. För klass 1, 2 och 3 har 95:e percentilen bedömts till 1000, 30000 respektive 60000 kr. Resultatet av denna bedömning skapar följande fördelningar för C_s i respektive klass med lognormalfördelningen – $Lognormal(\mu, \sigma^2)$:

1. $Lognormal(5,99, 0,557)$
2. $Lognormal(9,55, 0,463)$
3. $Lognormal(10,545, 0,277)$

Dessa fördelningar redovisas tillsammans med skadekostnaderna för tidigare redovisade fall i Figur 4.



Figur 5 Antagna kostnadsfördelningar för respektive skadeklass redovisade som box-plottar tillsammans med skadekostnaderna för de fall som redovisas i Figur 2.

Definitionerna av f_s och C_s , beräknar R_s för alla riskobjekt (byggnad) i varje åtgärdsalternativ. Med ett alternativ definierat som nollalternativet (A_0), ges nyttan av ett alternativ genom:

$$B_i = R_0 - R_i, \quad (1).$$

Varje alternativ har en investeringskostnad, c_i (kostnaden relativt A_0). Nettonyttan (NB) av ett alternativ ges av:

$$\Phi_i = B_i - c_i. \quad (2)$$

5 RESULTAT

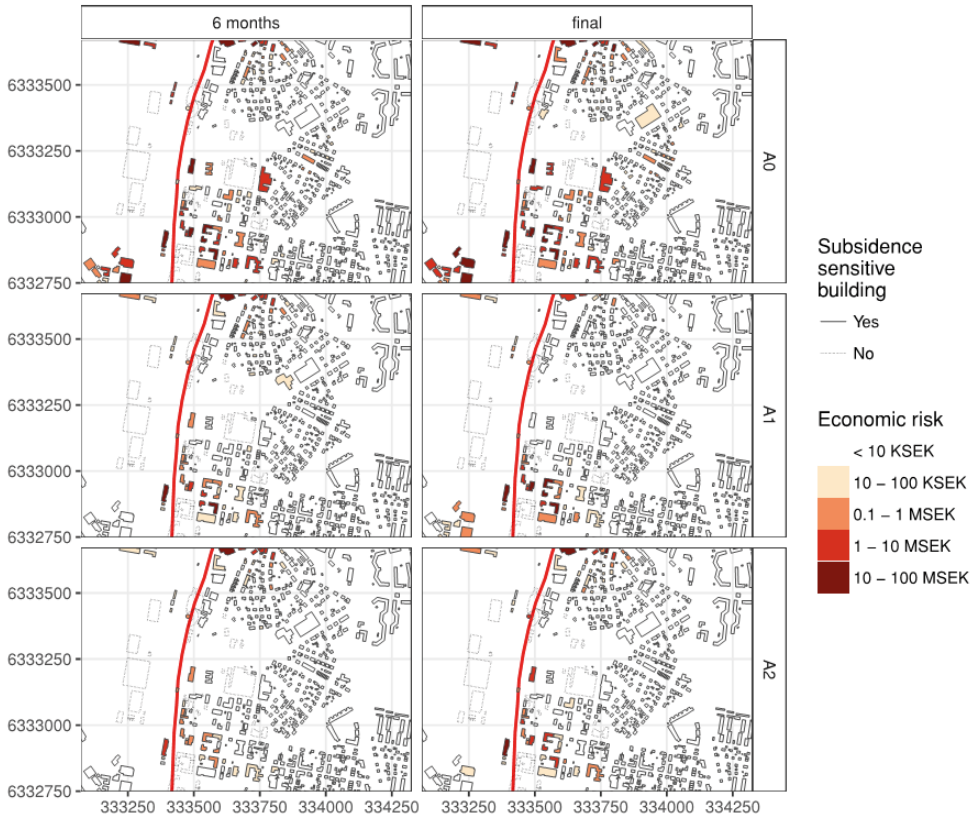
Den ekonomiska risken för skada beräknas från tidigare redovisade simuleringar av marksättning i delrapport tre (Sundell et al., 2018b) och skadekostnadsfunktionerna (C_s) i avsnitt 4. I denna beräkning är hamnbyggnader samt byggnader på kvarteret Renen som planerar att rivs samt byggnader som är grundlagda på berg borttagna ur beräkningen, se Figur 5.

Beräkningen har endast genomförts för tre av de fem tidigare redovisade alternativen. Alternativ VF4k (se tidigare delrapporter) med tätning till $K=10^{-8}$ m/s har uteslutits eftersom det orsakade barriäreffekter med förhöjda grundvattennivåer. Även alternativ VF4m har uteslutits då grundvattensänknings- samt sättningsbeloppen är snarlika alternativ VF4l. För att förtydliga att ett alternativ är nollalternativet och att de andra alternativen jämförs mot detta, har namnen för de tre återstående alternativen ändrats enligt Tabell 1.

Tabell 1 Namn för åtgärdsalternativ i denna delrapport jämfört med tidigare delrapporter.

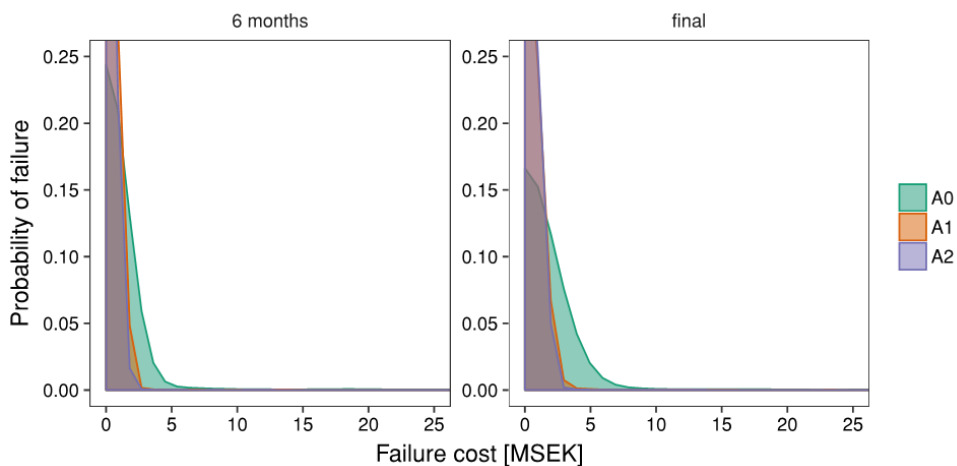
Namn i denna delrapport	Namn i delrapport 2 och 3
A ₀	Alt 1 (VF4i) – Helt utan tätning
A ₁	Alt 2 (VF4j) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=10^{-7}$ m/s
A ₂	Alt 4 (VF4l) – Tätning av schakt och sprickzoner till $K=10^{-8}$ m/s med dränering under schakt

Som framgår av Figur 5 är R_s för enskilda byggnader korrelerade till platser med större marksättningar (se delrapport 3). Eftersom de ekonomiska kostnaderna av en marksättning, C_s , uttrycks per kvadratmeter (se avsnitt 4) innebär större marksättningar för större byggnader också större R_s . Även om riskkostnaden är stor för enskilda byggnader bedöms den som rimlig jämfört med de historiska fall som presenteras i avsnitt 3.



Figur 6 Ekonomisk risk (R_s) per byggnad och alternativ för 6 månader och efter fullständig konsolidering (final).

På samma sätt som i Figur 3 men uttrycket per byggnad (och inte alla byggnader sammantaget) beskrivs sannolikheten för skada till en kostnad av en viss storlek i Figur 6. Som framgår av Figur 6 är större kostnader mer vanligt i A_0 jämfört med A_1 och A_2 . Eftersom inga eller väldigt små sättningensbelopp är det vanligaste fallet för majoriteten av byggnader är också kostnader som approximerar noll det vanligaste fallet.



Figur 7 Sannolikheten för skada (f_s) och ekonomisk kostnad (C_s) för någon byggnad i de tre olika alternativen efter 6 månader och efter fullständig konsolidering. Notera att y-axeln är trunkerad.

Med R_s aggregerat för samtliga byggnader i varje alternativ kan det totala R_s och B_i efter 6 månader och efter fullständig konsolidering beräknas, se Tabell 2. Jämfört med nollalternativet A_0 , är nyttan (B_i) mycket stor för både alternativ A_1 och A_2 . Med en positiv nettonytta (NB) som kriterium att investera i ett åtgärdsalternativ skapar de stora nyttorna (B_i) också stora marginaler för att investera (c_i) i både alternativ A_1 och A_2 .

Tabell 2 Ekonomisk risk, R_s (MSEK), per åtgärdsalternativ efter 6 månader och efter fullständig konsolidering (final).

Alt	6 månader		Final	
	R_s	B_i	R_s	B_i
A_0	397		654	
A_1	79	318	135	519
A_2	38	359	116	538

Även om nyttorna är stora, är R_s fortfarande betydande i både A_1 och A_2 , vilket innebär att ytterligare riskreducerande åtgärder kan vara motiverade beroende av vilken investeringskostnad dessa har. Sådana åtgärder inkluderar t.ex. infiltration för att upprätthålla grundvattennivåer inom områden med byggnader med hög R_s . Eftersom osäkerheten i sättningens storlek är stor (se resultat av simuleringar i delrapport 3) och modellen för byggnadernas respons på marksättningen är förenklad rekommenderas likasom i delrapport 3 en detaljerad utredning av de byggnader med höga R_s . En sådan utredning kan inkludera en detaljerad inventering av byggnaderna, ytterligare provtagning och baserat på denna en konventionell geoteknisk beräkning av sättningarnas storlek för enskilda byggnader. Baserat på utfallet av denna utredning kan

detaljerade åtgärder i form av infiltration och mätningar av grundvattennivåer och sättningrörelser planeras.

6 REFERENSER

- Bjerrum, L. (1963). *Allowable settlement of structures*. Paper presented at the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden.
- Bjerrum, L. (1967). Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Geotechnique*, 17(2), 83-118. doi:doi:10.1680/geot.1967.17.2.83
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2011). *Cost-benefit analysis: concepts and practice* (4th ed.). Upper Saddle River New Jersey: Pearson/Prentice Hall.
- Bonshor, R. B., & Bonshor, L. L. (1996). *Cracking in Buildings*: Construction Research Communications Limited.
- Boone, S. J. (1996). Ground-Movement-Related Building Damage. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(11), 886-896. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:11(886)
- Boscardin, M., & Cording, E. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1-21. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1)
- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525-538. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- Chiocchio, C., Iovine, G., & Parise, M. (1997). *A proposal for surveying and classifying landslide damage to buildings in urban areas*. Paper presented at the International Symposium on "Engineering geology and the environment", Athens, Greece.
- Cooper, A. H. (2008). The classification, recording, databasing and use of information about building damage caused by subsidence and landslides. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41(3), 409-424. doi:10.1144/1470-9236/07-223
- Driscoll, R. (1995). *Assessment of damage in low-rise buildings, with particular reference to progressive foundation movement*
- European Committee for Standardization. (1997). Eurocode 7 Geotechnical design - Part 1 : General rules (Vol. BS EN 1997-1:2004, pp. 172).
- Jönsson, L.-E., & Ahlström, S. (2015). *Teknisk utredning av Brogatan 2*. Göteborg: ÅF-Infrastructure AB Retrieved from [http://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Pustervik%20-%20Bost%20-%20A4der%20vid%20Brogatan%20\(Kv%20R%20-%20B6da%20Bryggan\)-Plan%20-%20samr%20-%20A5d-Byggnadsteknisk%20utredning/\\$File/11_Byggnadsteknisk_utredning_Brogatan_2.pdf?OpenElement](http://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Pustervik%20-%20Bost%20-%20A4der%20vid%20Brogatan%20(Kv%20R%20-%20B6da%20Bryggan)-Plan%20-%20samr%20-%20A5d-Byggnadsteknisk%20utredning/$File/11_Byggnadsteknisk_utredning_Brogatan_2.pdf?OpenElement)
- Karlsruh, K. (1999, 7-10 June 1999). *General aspects of transportation infrastructure*. Paper presented at the Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance : Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Netherlands.

- Karlsruud, K. (2015). *Metoder for vurdering av skader på bygninger som følge av deformasjoner i grunnen (Methods for valuation of damages on buildings due to ground deformations)* Retrieved from <https://www.ngi.no/download/file/4442>
- Korff, M. (2013). *Response of piled buildings to the construction of deep excavations* (Vol. 13): IOS Press.
- Larsson, R., & Sällfors, G. (1981). Beräkningar av sättningar i lera. [Calculation of settlement in clay]. *Väg- och vattenbyggaren*(3), 39-42.
- Lindskoug, N.-E., & Nilsson, L.-Y. (1974). *Grundvatten och byggande. STEGAs arbete 1966-73 (Groundwater and civil engineering. The works of STEGA 1966-73)*. Stockholm: Byggeforskningen Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/78626653.pdf>
- Möller, H., Hall, A., Nilsson, L., & Tremblay, M. (2016). *PM UTREDNING SÄTTNINGAR I FASTIGHETER Varbergstunneln, Väst kustbanan, Varberg-Hamra*. (101107-08-025-001). Göteborg Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/3932c059cdf44808aa232bd8259c52cc/101107_08_025_001.pdf.
- Olofsson, B. (1994). Flow Of Groundwater From Soil To Crystalline Rock. *Applied Hydrogeology*, 2(3), 71-83. doi:10.1007/s100400050052
- Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D. L., & Cherry, J. A. (1999). Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35(11), 3327-3341. doi:10.1029/1999WR900148
- Phien-vej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4), 187-201. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>
- Rankin, W. J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 5(1), 79-92. doi:10.1144/gsl.eng.1988.005.01.06
- Skempton, A. W., & Macdonald, D. H. (1956). THE ALLOWABLE SETTLEMENTS OF BUILDINGS. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768. doi:10.1680/ipeds.1956.12202
- Son, M., & Cording, E. (2005). Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 162-177. doi:doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(162)
- Statistiska Centralbyrån. (2017). Produktionskostnad brutto per lägenhet och per kvm lägenhetsarea för flerbostadshus och bostadsarea för gruppbyggda småhus. Retrieved from <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/boende-byggande-och-bebyggelse/byggnadskostnader/priser-for-nyproducerade-bostader/pong/tabell-och-diagram/produktionskostnad-brutto-per-lagenhet-och-per-kvm-lagenhetsarea-for-flerbostadshus-och-bostadsarea-for-gruppbyggda-smahus/>
- Sundell, J., Rosén, L., & Haaf, E. (2017). *Metodbeskrivning av probabilistisk modell för berg-, jordlager och grundvattennivåer - Varbergstunneln*. Göteborg: Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology

- Sundell, J., Rosén, L., & Haaf, E. (2018a). *Invers probabilistisk modellering av förändrade grundvattennivåer - Varbergstunneln*. Göteborg: Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology
- Sundell, J., Rosén, L., Haaf, E., & Tornborg, J. (2018b). *Metodbeskrivning av probabilistisk marksättningsmodell vid grundvattensänkning - Varbergstunneln*. Göteborg: Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology
- Wroth, C., & Burland, J. (1974). *Settlement of buildings and associated damage*. Paper presented at the SOA Review, Conf. Settlement of structures, Cambridge.
- Xue, Y.-Q., Zhang, Y., Ye, S.-J., Wu, J.-C., & Li, Q.-F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 48(6), 713-720. doi:10.1007/s00254-005-0010-6



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19, Stockholm

ISSN 1104-1773