

## Risicanalys av grundvattensänkning i sättningskänsliga områden

Till	SBUF
Från	Anders Bergström, NCC Jonas Sundell, COWI
Datum	2012-09-06
Uppdragsnr	7180 515 (NCC), 12608 (SBUF)
Granskad	
Status	
Godkänd	
Signatur	ABe

Syftet med detta projekt har varit att utveckla en metod för risicanalys vid grundvattensänkning i sättningskänsliga områden i samband med undermarksbyggande. Metoden bygger på en integrerad och probabilistisk jordlager-, grundvatten- och marksättningsmodell. Genom utvecklad metod är det möjligt att visa vilken risk för sättningskada som föreligger inom olika delar av ett område till följd av en planerad grundvattensänkning. Metoden visar också vilka parametrar i modellen som har störst betydelse för osäkerheterna i olika delar av området. Genom denna metod kan typ av undersökning eller byggnadsteknisk åtgärd och plats för dessa, planeras till där de förväntas ha störst betydelse för riskminskningen.

### Bakgrund

Vid infrastrukturprojekt är grundvattensänkningar vanligt förekommande i såväl bygg- som permanentskede som en konsekvens av anläggningar under grundvattennivå. När grundvattnet sänks inom områden med sättningskänsliga jordar kan marksättningar uppkomma, vilka riskerar att orsaka skador på byggnader och anläggningar. Marksättningar inom ett tätbebyggt område kan ge upphov till mycket stora konsekvenser och kostnader om byggnader skadas. Verksamhetsutövaren är enligt miljöbalken ansvarig för grundvattensänkningen och därigenom skyldig att ta på sig de kostnader och konsekvenser som uppstår. Om det föreligger risk för betydande skador ökar behovet av en tillförlitlig bedömning av marksättnings omfattning och dess konsekvenser. För att reducera osäkerheter i bedömningen genomför verksamhetsutövaren hydrogeologiska samt geo- och bergtekniska undersökningar och åtgärder. Undersökningar inkluderar exempelvis geotekniska sonderingar, hydraultester och berg- och sprickartering. Åtgärder kan inkludera berginjektering, infiltration av vatten för upprätthållande av grundvattennivåer och förstärkning av byggnader och dess grundläggning. Undersökningar och åtgärder är mycket kostsamma varför det är viktigt att typ och plats för dessa planeras till där de har störst effekt för riskminskning. En minskning av risken är nödvändig i de områden där det bedöms att risken för skada är betydande, samt att osäkerheterna i bedömningen är så pass stora att ytterligare undersökningar och åtgärder är av betydelse för att reducera dessa osäkerheter. Osäkerheter i prognosen av marksättning kan ge upphov till två typer av betydande risker för projektet:

1. *Risken att inte genomföra ytterligare undersökningar och åtgärder när det finns en risk för skadlig marksättning. Om en acceptabel*

risknivå inte uppnås och grundvattensänkningen orsakar skador, är verksamhetsutövaren enligt miljöbalken ansvarig för kostnaderna och konsekvenserna av dessa skador.

2. *Risken att genomföra ytterligare undersökningar och åtgärder när det inte finns någon risk för skadlig grundvattensänkning och marksättning.* Detta är en risk för verksamhetsutövaren där konsekvenserna är onödiga kostnader till följd av undersökningar och åtgärder som inte behövs.

Traditionellt har prognos av grundvattensänkning redovisats som ett påverkansområde över en större yta, medans de geotekniska beräkningarna över marksättning har genomförts vid läget för där undersökningen genomförts och inte över hela området som riskerar sättningskadorna till följd av grundvattensänkning. Även om det finns osäkerheter i såväl prognos av grundvattensänkning som i prognos av marksättning är det sällan dessa har hanterats på ett formaliserat sätt, där den ena beaktar osäkerheter i den andra.

## Syfte

Syftet med det genomförda utvecklingsprojektet har varit att:

*Utveckla en metodik för att uppnå ett tydligt beslutsunderlag, för bedömning av risk för marksättning till följd av grundvattensänkning samt genomförande av riskreducerande undersökningar och åtgärder, genom att kvantifiera risken för skada och osäkerheter i prognosen.*

Metodiken är baserad på integrerad probabilistisk geoteknisk/, hydrogeologisk modellering och dataanalys av modellens ingående parametrar.

Specifika mål har varit att:

- Utveckla en metodik för att beskriva hur osäkerheter i indata ska kvantifieras
- Utveckla en metodik för att genomföra probabilistiska beräkningar i en numerisk grundvatten och marksättningsmodell

Utvecklingsprojektet har genomfört metodutveckling som visar på hur risker från skadliga marksättningar orsakade av grundvattensänkning bättre kan förutspås. En mer tillförlitlig riskbedömning kan effektivisera beslutsfattandet, minska kostnaderna för riskreducerande åtgärder och skapa bättre förutsättningar för kommunikation mellan sakägare, myndigheter och entreprenörer.

Utvecklingsprojektet är en vidareutveckling av en fallstudie som genomfördes i samband med projekt Riksväg 50 genom Motala under 2011, på uppdrag av Trafikverket. Då en teknisk lösning valdes, som inte krävde grundvattensänkning, bro istället för tunnel, har det inte varit möjligt att validera modellens utfall på annat sätt än genom konventionella beräkningsmetoder.

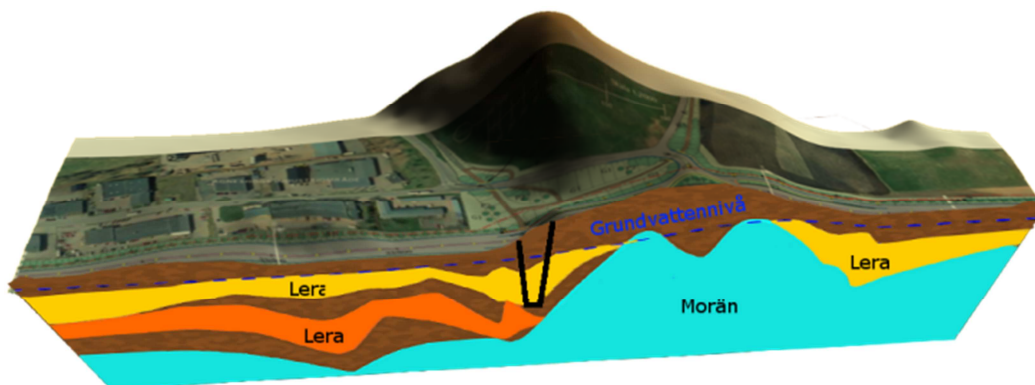
## Genomförande

Med stöd av SBUF har detta utvecklingsprojekt utförts av Jonas Sundell, hydrolog på COWI och Anders Bergström, geotekniker på NCC Teknik, tillsammans med tre examensarbetare från Chalmers, KTH och LTH, med inriktningar mot hydrogeologi, geoteknik respektive geografiska

informationssystem. Den integrerade, probabilistiska marksättningsmodellen bygger på tre modeller.

Den första modellen (Pan, 2012) beskriver jordlagerföljden i området. Modellen i fallstudien bygger på data från totalt ca 100 sonderingar, både nya som genomförts med anledning av det planerade vägbygget och äldre som genomförts med anledning av tidigare hus- och industribyggnation i området. Jordlagerföljden har tolkats från sonderingar för jordprovtagning, som skruv och provgrop, men också från CPT och trycksondering. Ytor över gränserna mellan vart och ett av jordlagren; övre friktionsjord, lera, mellersta lager friktionsjord, lera, understa lager friktionsjord, och morän (Figur 1), har interpolerats genom interpolationsmetoden kriging (Isaaks & Srivastava, 1989). Dessa ytor har använts för att beskriva medelvärdet över sannolik nivå för var och en av jordlagergränserna. Det är mer sannolikt att jordlagren liknar förhållandena på en undersökt plats om platsen ligger nära än om den ligger längre bort.

Kriging använder sig av variogram som visar hur sambandet varierar mellan undersökningar som ligger nära jämfört med undersökningar som ligger längre bort. Genom detta är det möjligt att beskriva hur osäkerheterna, standardavvikelsen, varierar över området. När medelvärdet och standardavvikelsen har erhållits har det varit möjligt att genomföra en Monte Carlo-simulering över hur jordlagernivåerna kan variera över området. Simuleringen har genomförts i programvaran Crystal Ball tillsammans med Excel.



Figur 1 Profil över jordlagerföljden i området för fallstudien med gångtunneln markerad i mitten av profilen. De bruna områdena visar friktionsjord.

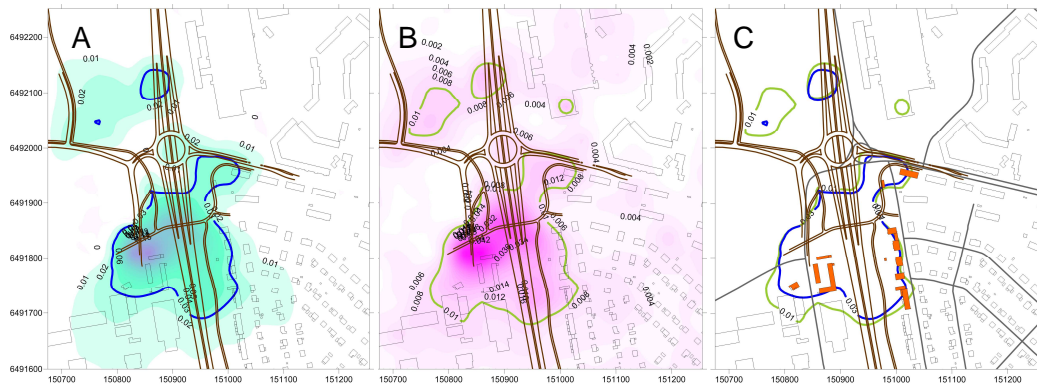
Den andra modellen (Tisell, 2012), beskriver grundvattensänkningen till följd av gångtunneln. En medelgrundvattennivå har interpolerats fram genom mätningar i elva grundvattenrör. Grundvattensänkningen antas ske i det mellersta friktionslagret. Hydrostatiskt tryck mellan de olika lagren friktionsjord och tillika vattenförande magasinerna har antagits råda. När friktionsjord saknas har grundvattenströmningen antagits ske huvudsakligen i moränen. Modellen bygger på en Excel-baserad finit differensmodell som bland annat finns beskriven av Gustafson (2009). De parametrar som styr grundvattensänkningen utbredning är; nettonederbörden som styr grundvattenbildningen, lerans vertikala konduktivitet som styr läckaget till det mellersta lagret friktionsjord, den hydrauliska konduktiviteten i friktionsjorden och transmissiviteten i moränen. Mäktigheterna för de olika jordlagren från jordlagermodellen har använts i simuleringen av grundvattensänkningen för att

beräkna transmissiviteten i friktionsmaterialet och tillsammans med lerans konduktivitet beräkna läckaget. Jordlagermodellen har också använts för att styra i vilka områden som villkoren för modellen ska gälla. De olika jordlagren ses var och en som en geologisk enhet där varje enhet har samma egenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten för friktionsmaterialet och dess variation har beräknats genom hydraultester och från siktkurvor för materialet. Typvärden för medelvärde och standardavvikelse har antagits för lerans konduktivitet och moränens transmissivitet och årsmedlet för nettonederbörden. Genom att samtliga ingående parametrar, liksom jordlagermodellen, har tilldelats stokastiska variabler, har en probabilistisk grundvattensänkingsmodell kunnat skapas genom Monte Carlo-simulering i Excel.

Det tredje steget har varit att integrera sättningsberäkningar med jordlager- och grundvattenmodellen (Hashemi 2012). Sättningsgenererande last har varit effektivspänningsökningen som orsakats av grundvattensänkningen, den andra modellen. Jordlagrens mäktighet har erhållits ur den första modellen, se figur 1. Sättningarna har beräknats för primär konsolidering. Lerans kompressionsegenskaper har tolkats ur CRS-försök från 5 st undersökningspunkter. Förkonsolideringen har angivits som en överkonsolideringsgrad, tolkad utifrån utförda undersökningar. Kompressionsmodulen har tolkats och angivits med linjär ökning mot djupet och med standardavvikelse tolkad ur sammanställning av utförda CRS-försök. Stickprov har genomförts för att verifiera den geotekniska modellen med konventionella beräkningsprogram, t ex Geo Suite Settlement. Stickproven har visat god överensstämmelse mellan Geo Suite och den excelbaserade sättningsmodellen.

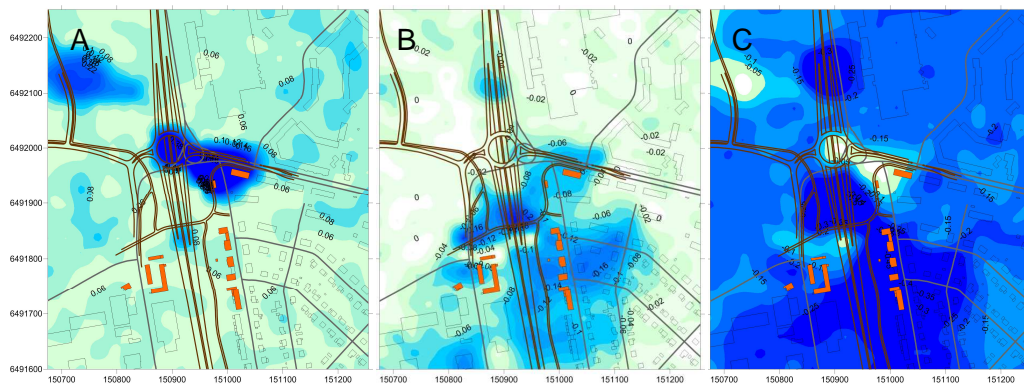
## Resultat

Utfallet i meter marksättning över olika delar av området har kunnat exporteras som percentiler från den integrerade och probabilistiska modellen. Exempelvis kan väljas medelvärdet (det mest förväntade utfallet) eller 95-percentilen (prognos med större säkerhet), där de olika värdena för marksättning över olika delar av området framgår redovisas, se exempel i Figur 2 A. Även osäkerheterna i prognosen över olika delar av området har kunnat beskrivas genom standardavvikelsen i utfallet, Figur 2 B. Någon närmare studie över vad som är en acceptabel risk och osäkerhet har inte genomförts i fallstudien då tunneln inte byggdes. Som gräns för när en skada kan inträffa på en byggnad har en 0,03 m total marksättning valts som acceptabelt värde. Denna gräns har valts utifrån acceptabel differenssättning för en mindre bostadsbyggnad. I exemplet i Figur 2 har överstigande av 95 percentilen för 0,03 m marksättning inom områden med byggnader bedömts vara en gräns för oacceptabelt stor risk för projektet. Om osäkerheterna inom detta område är större än 0,01 m i standardavvikelse så har de bedömts vara för stora och bör reduceras. De byggnader som ligger inom detta överlappade området är markerade med orange, Figur 2 C.



**Figur 2** Bilden till vänster (A) visar 95-percentilen för marksättning (meter). Den blå linjen visar 0,03 m marksättning för 95-percentilen. Utanför linjen är marksättningen mindre än 0,03 m för 95-percentilen, och innanför större. Bilden i mitten (B) visar standardavvikelse av marksättning (meter) i olika delar av modellområdet. Den gröna linjen visar 0,01 m standardavvikelse, innanför den gröna linjen är standardavvikelsen större och utanför mindre. Bilden till höger (C) visar området där 95-percentilen för 0,03 m marksättning överlappar 0,01 m standardavvikelse. Byggnader inom område med risk för skada och stora osäkerheter i bedömningen är markerade med orange.

Modellen från utvecklingsprojektet kan även visa samtliga parametrars bidrag till osäkerheter i en viss del av området, Figur 3. Parametrar som är av stor betydelse för osäkerheterna inom området med oacceptabelt hög risk och osäkerhet bör reduceras genom undersökningar och åtgärder. Undersökningar och åtgärder som syftar till att reducera parametrar som inte har stor betydelse för osäkerheterna inom detta område är av underordnad betydelse. Genom vetenskapen om parametrars betydelse är det möjligt att välja typ och plats för undersökning och åtgärd som mest har störst betydelse för den förväntade riskreduktionen.



**Figur 3** Känslighetsanalys för tre parametrar i den integrerade modellen i fallstudien; plusnivå för överkant lera (A), vertikal hydraulisk konduktivitet för den översta leran (B) och överkonsolideringsgrad för den översta leran (C). De vita områdena med värdet noll innebär att parametern inte har någon betydelse för osäkerheterna i modellen. Ett värde på 1 eller -1 innebär att det är den enda parametern som bidrar till osäkerheter i modellen. Desto mer mörkblå värdena är i figuren, desto mer bidrar parametern till osäkerheter i modellen.

## Slutsatser

Utvecklingsprojektet har visat att det är möjligt att samordna olika discipliner (hydrologi, geoteknik och geostatistik) i en gemensam probabilistisk beräkningsmodell, att kunna analysera och kvantifiera risker och osäkerheter, samt att presentera dem på ett tydligt och kommunicerbart visuellt sätt. Genom modellen kan hydrogeologiska och geotekniska parametrars bidrag till osäkerheter jämföras med varandra. Metodiken bygger på relativt enkla beräkningsprinciper för såväl hydrogeologi och geoteknik. I många fall kan dessa vara fullt tillräckliga om det är indatan som ger upphov till de största osäkerheterna i modellen och inte de beräkningsprinciper som används.

För att principerna i utvecklingsprojektet ska uppnå en allmän acceptans och kunna användas kommersiellt krävs dock vidare studier. En viktig fråga att besvara är vad som är en acceptabel risk och för vem. En entreprenör och en fastighetsägare kan ha helt olika uppfattningar kring detta. Ett allmänt tillvägagångssätt för att bestämma vad som är en acceptabel risk i varje enskilt fall bör dock kunna tas fram i samråd med branschen, sakägare och juridisk- och ekonomisk expertis.

Metodiken bör också utvecklas för att kunna användas tillsammans med datavärdesanalys (VOIA, Value of Information Analysis). Datavärdesanalysen innebär att kostnaderna för att genomföra riskreducerande undersökningar och åtgärder jämförs med den reducerade ekonomiska risken för felaktiga beslut. Genom att jämföra nettovärdet för olika riskreducerande åtgärder eller undersökningar med varandra kan de som har störst värde väljas till dess att en acceptabel risknivå har uppnåtts.

Den integrerade jordlager-, grundvatten- och marksättningsmodellen kan förfinas genom att mer utvecklade beräkningsprinciper används. En mer ingående parameterstudie och förslag till metodik för val av matematiska fördelningar är nödvändig för en mer tillförlitlig riskanalys. Vidare studier av ingående parametrars beroenden av varandra är nödvändig för att risker inte ska över- eller underskattas. Monte Carlo-simuleringen och beräkningarna skulle kunna genomföras i Matlab för att erhålla ökad prestanda. Jordlagermodellen bör förfinas genom att exempelvis möjliggöra beskrivning av hur heterogeniteten varierar över området och beakta undersökningstypens påverkan på osäkerheterna. Beräkningsmetodiken i jordlagermodellen som utvecklats i fallstudien har inte beaktat de olika punkternas beroenden av varandra, det vill säga att sannolikheten att exempelvis 90-percentilen för lermäktigheten av två oberoende punkter skulle inträffa samtidigt inte är 90 procent, utan sannolikt lägre. Grundvattenmodellen skulle till exempel kunna vara baserad på Modflow, som är en konventionell och långt utvecklad metod för beräkning av grundvattensänkning. Slutligen skulle marksättningsmodellen kunna behandla tidsberoenden som ett transient grundvattenavsänkingsförlopp, om endast en temporär grundvattensänkning planeras, samt krypeffekter i leran.

## Referenser

Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Stockholm: Forskningsrådet Formas.

- Isaaks, E. H., & Srivastava, M. R. (1989). *An Introduction to applied geostatistics*. Oxford: Oxford University Press.
- Pan, M (2012). *Risk Evaluation of the Soil Strata Model*. (Opublicerat material).
- Hashemi, E (2012). *Ground settling due to groundwater drawdown – Integrated probabilistic model for soil, groundwater and settlement*. (Opublicerat material).
- Tisell, V (2012). *Risk management of groundwater drawdown in settlement sensitive areas - Integrated probabilistic model for soil, groundwater and settlement*. (Opublicerat material).

**Ytterligare information:**

Jonas Sundell, Cowi, tel 070-6548188, e-post: josu@cowi.se

Anders Bergström, NCC teknik, tel 031-771 50 37, e-post: anders.bergstrom@ncc.se