

Synpunkter på Trafikverkets modellberäkningar för ansökan om vattenverksamhet för Förbifart Stockholm

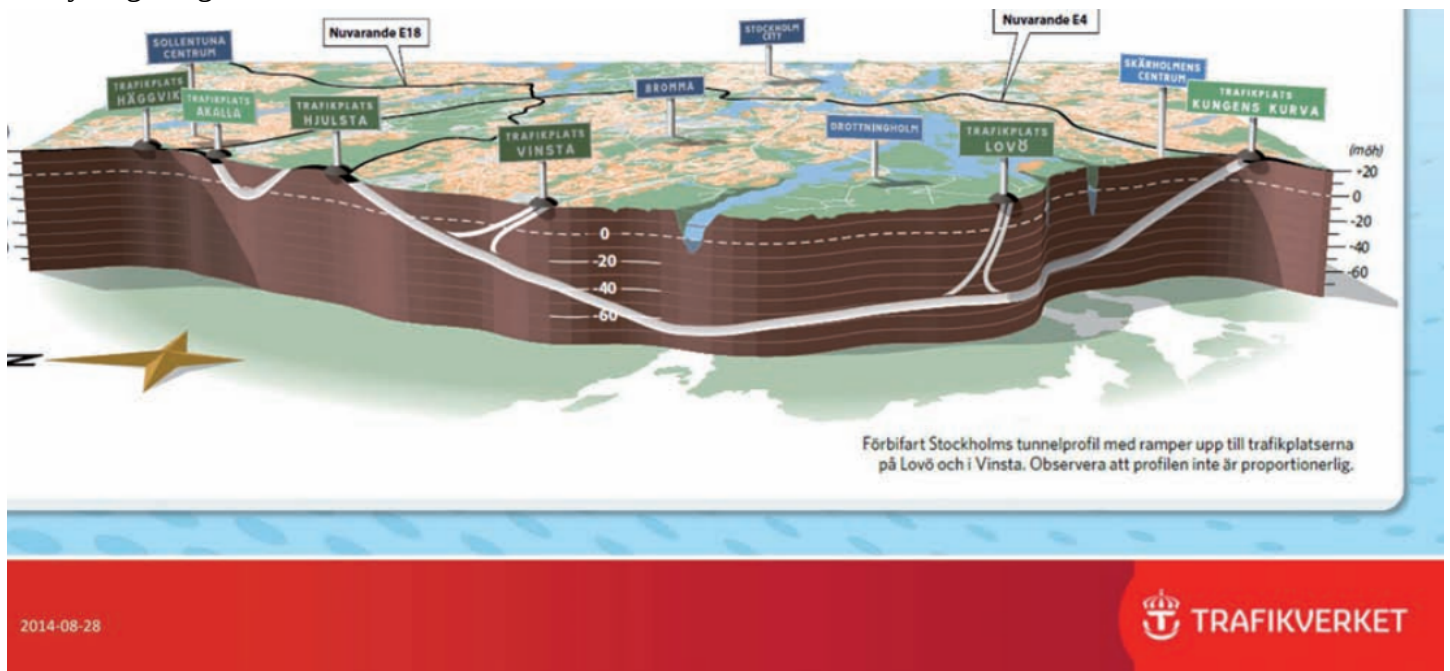
Upplaga 2018-06-23

© Björn Gustafsson

Inledning

Förbifart Stockholm är en planerad 21 km lång motorväg som huvudsakligen skall gå i tunnel långt under grundvattenytans nivå. Denna skrift är ett försök till granskning av Trafikverkets hydrogeologiska modell beräkningar och bygger på material som använts vid Djurgården- Lilla Värtans Miljöskyddsförenings (DLV:s) överklaganden i mark- och miljödomstolarna.

Projektet Förbifart Stockholm är utförligt beskrivet på Trafikverkets (TRV:s) hemsida. Hydrogeologin finns redovisad i [1], [2] och [3].



Bilderna i denna skrift med Trafikverkets logotyp är hämtade från TRV:s material i [1].

De hydrogeologiska beräkningsmetoderna som TRV använt i ansökan verkar inte ha utsatts för någon grundligare granskning före huvudförhandlingarna i Mark- och miljödomstolen, MMD. När DLV efter huvudförhandlingarna framförde kritik av hur påverkansområdet avgränsas och överklagade ignorerades synpunkterna totalt av MMD och gavs inte prövningstillstånd av Mark- och miljööverdomstolen, MÖD.

DLV:s överklaganden har skrivits av Claes Trygger och Björn Gustafsson. Det är oklart hur mycket tid domstolarna ägnat dem innan de avspisades men det känns som att våra synpunkter är värda en större läsekrets än vad i praktiken de två tekniska råden vid MMD och MÖD utgör.

Denna sammanställning med kompletteringar har gjorts av Björn Gustafsson med synpunkter och rättelser från Claes Trygger. Kanske kan denna skrift inspirera någon högskoleinstitution inom ämnesområdet att gå vidare med en granskning av TRV:s hydrogeologiska beräkningar för Förbifartsprojektet.

Rättelser och synpunkter på skriften tas tacksamt emot i form av ebreiv till bjorn.gustafs63@gmail.com

Stockholm 2016-02-19

Björn Gustafsson

Varför görs hydrogeologiska modellberäkningar?

Det vatten som oundvikligen rinner in i tunnlar under grundvattenytan måste bortledas och renas varvid marken ovanför tunneln riskerar att dräneras. I Miljöbalken (MB) 29 kap kan man läsa *"För miljöbrott döms till böter eller fängelse i högst två år den som med uppsåt eller av oaktsamhet bedriver verksamhet eller vidtar en åtgärd som ändrar yt- eller grundvattennivån på ett sätt som skadar eller kan skada människors hälsa, djur eller växter i en omfattning som inte har ringa betydelse eller som medför eller kan medföra någon annan betydande olägenhet i miljön."*

Projektet måste prövas enligt Miljöbalken kap. 11, vattenverksamhet. Sökanden måste visa hur stor ändringen av grundvattennivån beräknas bli, vilket görs med modellberäkningar. Miljöbalken har dock inte preciserat vad *"ändring av grundvattennivån"* avser och svaret är som vi ska se inte självklart. Mark- och miljödomstolen skall sedan bedöma projektets tillåtlighet och eventuellt ställa krav på begränsning av inläckta vattenvolymer mm.

Förhandlingar i Mark och miljödomstolen i september 2014

Den 2-12 september 2014 pågick förhandlingarna för vattenbortledning mm för Förbifartens tunnlar i Mark- och miljödomstolen, MMD. Där presenterade Trafikverkets konsult bland annat hur de hydrogeologiska modellberäkningarna genomförts med en ny metod som i vilket fall inte använts så sent som vid Norra Länken och Citybanan. Metoden används för att beräkna inläckage av vatten i tunnlar samt för att avgränsa påverkansområdet men däremot inte för att beräkna vattenbalansen.

Hur definieras påverkansområde?

I ansökan om prövning enligt Miljöbalken skriver Trafikverket i [1]:

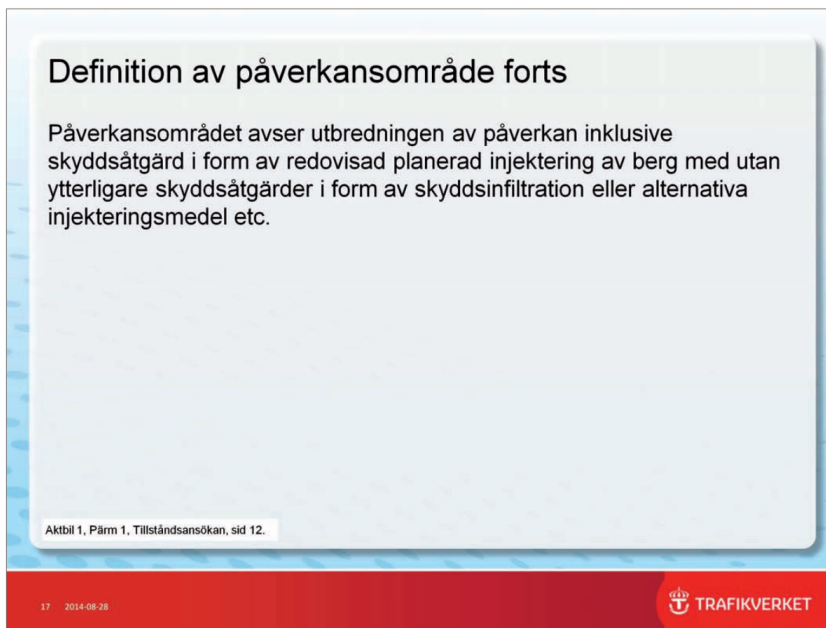
Definition av påverkansområde

Område inom vilket grundvattenbortledningen förväntas kunna ge en direkt påverkan på grundvattnet i sådan omfattning att den går att påvisa och kan ha betydelse för fastigheter eller för miljön.

Påverkansområdet har i denna ansökan definierats som ett område med en yttre begränsning som sammanfaller med det av följande områden som har störst utbredning:

- Område med 1 m grundvattenavsänkning eller mer i berg på tunnelnivå.
- Förekommer flera tunnlar på olika nivåer avses påverkan vid nivån för huvudtunnlarna.
- Område med 0,3 m grundvattensänkning eller mer i undre grundvattenmagasinet i jord.

Aktbil 1, Pärm 1, Tillståndsansökan, sid 12.



I ansökan föreslår Trafikverket således följande formulering av gränsvärdena för påverkansområdet:

1 m grundvattenavsänkning eller mer i berg på tunnelns nivå

respektive

0,3 m grundvattensänkning eller mer i undre grundvattenmagasinet i jord

TRV definierar inte ordet "grundvattenavsänkning". Det är lätt att tro att det betyder sänkning av grundvattenytans nivå men det är fel, TRV menar sänkning av grundvattnets trycknivå, ett begrepp som förklaras utförligt i bilaga 1. Det måste påpekas att det finns en uppsjö termer i svensk hydrogeologisk litteratur för detta centrala begrepp, se bilaga 11. Att man måste ange ett djup där gränsvärdet 1 m skall gälla ("tunnelns nivå") beror på att trycknivån varierar med djupet. Vid grundvattenytan är sänkningen noll.

Förutom att TRV:s föreslagna kriterium är helt irrelevant för syftet med påverkansområdet så är det i praktiken helt omöjligt att kontrollera om någon skulle önska det.

TRV använder likaså ordet "grundvattensänkning" utan definition. Ordet är inte synonymt med "grundvattenavsänkning" och används i samband med undre grundvattenmagasinet. DLV har inte överklagat den delen av definitionen, bl. a. för att vi inte sett hur den beräkningsmässigt tillämpas i ansökan.

Vad spelar påverkansområdet för roll?

De som har fastigheter eller mark innanför påverkansområdet räknas som sakägare och har ett mycket bättre rättsligt skydd än de vars egendom är utanför påverkansområdet. Bland annat kan de få sina rättegångskostnader betalda av den sökande (alltså TRV i detta fall). TRV har ekonomiska motiv att minska påverkansområdet så långt möjligt, fastighets- och markägare att vidga det.

TRV:s modellberäkning av en tunnels inverkan på grundvattennivån

För att kunna bedöma en tunnels påverkan på grundvattennivån innan den byggs är man hänvisad till modellberäkningar baserade på matematiska eller numeriska metoder. Bilderna nedan är från presentationsmaterialet som visades under förhandlingarna.

Övergripande metodik

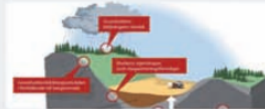
Jämförelse med tidigare tunnelprojekt i Stockholmsområdet:

Citybanan, Norra Länken

Analytisk formel + Vattenbalans + Hydrogeologiska bedömning

$$q = \frac{2\pi k_g H L}{\ln\left(\frac{r+t}{r}\right) + \frac{k_g}{k_b} \ln\left(\frac{2H}{r+t}\right) + \frac{k_g}{k_b} \xi}$$

+

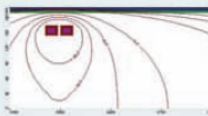


+

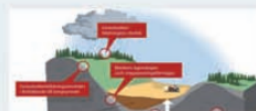


Förbifart Stockholm

Tvärsnittmodell + Vattenbalans + Hydrogeologisk bedömning



+



+



I beräkningsbilagan [3], avsnitt 3.2, anger TRV att inläckage enligt den analytiska formeln och enligt tvärsnittmodellerna ger god överensstämmelse.

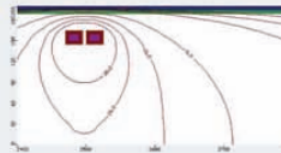
Trafikverkets nya beräkningsmetod

Vid tidigare stora projekt som Citybanan och Norra länken gjordes beräkningarna av inflödet av vatten till tunnlar med en "analytisk formel". För Förbifarten har den formeln bytts mot "tvärsnittsmodeller" som beräknas i datorprogrammet Modflow. Vad TRV menar med tvärsnittsmodell definieras i [3], kapitel 3. TRV jämför i bilden nedan för- och nackdelar för de två metoderna.

I beräkningsbilagan [3], avsnitt 3.2, anger TRV att inläckage enligt den analytiska formeln och enligt tvärsnittsmodellerna ger god överensstämmelse. Resultat från tvärsnittsmodellerna används inte för att beräkna vattenbalansen. Den egentliga nyheten reduceras till att påverkansområdet nu beräknas med tvärsnittsmodellen. Hur den beräknades i tidigare projekt anges inte.

Jämförelse av metodik för inläckageberäkning

$$q = \frac{2\pi KHL}{\ln\left(\frac{r+t}{r}\right) + \frac{K_1}{K_2} \ln\left(\frac{2H}{r+t}\right) + \frac{K_1}{K_2} \xi}$$



Analytisk formel

- Grundvattennivån konstant
- Ger inte påverkansområde
- Hanterar inte jordlager
- Ej kopplad till vattenbalans
- Ej utformad för flera tunnlar

Tvärsnittsmodell

- + Grundvattennivån kan variera
- + Beräknar påverkansområde
- + Hanterar överliggande jordlager och gränser
- + Koppling till vattenbalans
- + Flera tunnlar kan modelleras

Grundvattennivån kan variera

Den första punkten i bilden ovan anger att grundvattennivån kan variera i den nya metoden. Ordet grundvattennivå är inte entydigt definierat, det kan betyda grundvattenytans nivå eller grundvattnets trycknivå, vilket framgår av bilaga 11. Här måste det avse grundvattenytans nivå. Även om beräkningsprogrammet kan hantera en varierande nivå för grundvattenytan verkar man i beräkningsbilagan [3] hela tiden räknat med att den är fast.

Beräknar påverkansområdet

Metoden för att begränsa påverkansområdet utifrån resultat från tvärsnittmodellerna beskrivs nedan och i bilaga 7. DLV har överklagat metoden eftersom TRV inte anger ändringen av grundvattenytans nivå utan ändringen av grundvattnets trycknivå. Eftersom den varierar med djupet under grundvattenytan måste TRV samtidigt ange på vilket djup ändringen skall bestämmas och väljer utan någon motivering tunnelns golvnivå.

Koppling till vattenbalans

Bland fördelarna med den nya beräkningsmetoden med tvärsnittsmodeller angavs vid presentationen ”koppling till vattenbalans” i motsats till den äldre metoden som saknar det.

Det var inte förrän efter domen i MMD som DLV fick tillgång till PM Hydrogeologis beräkningsbilaga [3]. Vid begäran om prövningstillstånd kompletterades överklagandet med påvisandet att grundvattenbildningen underskred det som krävs för att upprätthålla grundvattenytan. Eftersom prövningstillstånd inte gavs har dessa frågor inte avhandlats i MÖD.

Vattenbalansen behandlas i TRV:s ansökan inte med resultat från tvärsnittmodellerna utan i kapitel 2 i beräkningsbilagens [3] med hjälp av överslagsberäkningar som visar på en positiv vattenbalans.

TRV:s ”algorithm” för bestämning av påverkansområdet i berg

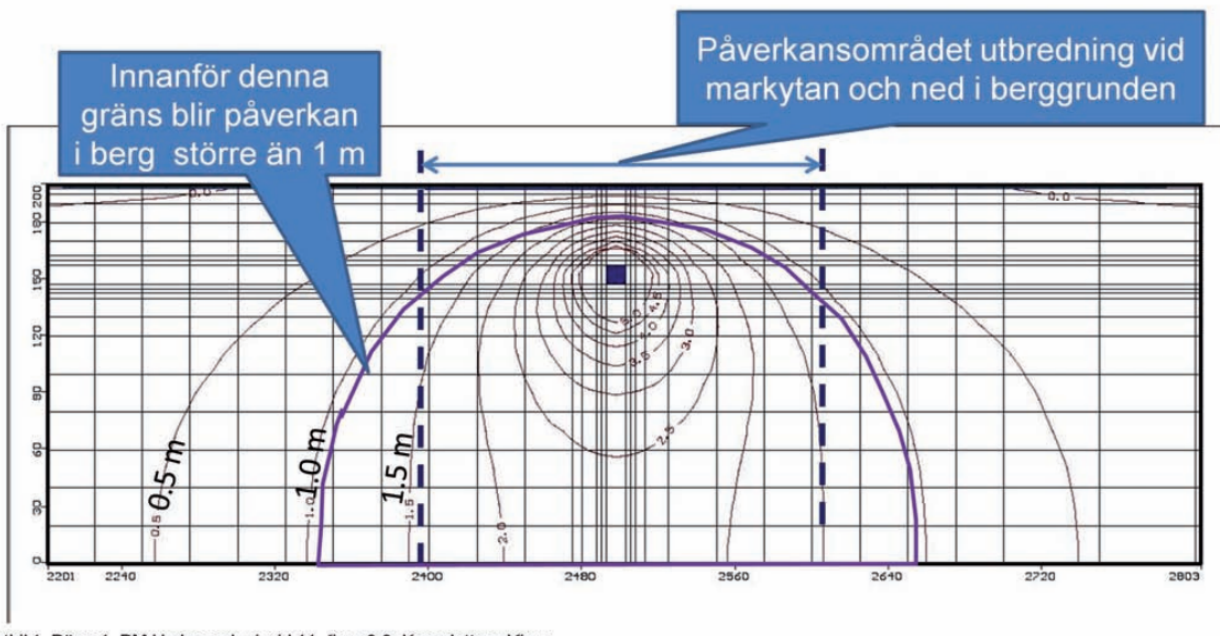
Figuren nedan visades såvitt vi vet för första gången under huvudförhandlingarna i september 2014. Tidigare, i samband med ansökans remissbehandling, hade i så fall enbart den skrivna definitionen redovisats [4]. Då löd den “*område med 1 m grundvattenavsänkning eller mer i berg ned till tunnelnivå*” (vår fetstilsmarkering). Frågan är om remissinstanserna hade någon möjlighet att förstå metoden att definiera gränsen för påverkansområdet. Det är inte lätt ens med den förklarande figuren nedan.

Som nämnts använder TRV ordet grundvattenavsänkning utan definition och för den som tänker att det betyder sänkning av grundvattenytan blir figuren obegriplig. Men nivåkurvorna i figuren avser sänkningen av grundvattnets trycknivå.

TRV:s metod att bestämma gränsen för påverkansområdet består i att söka upp skärningspunkten mellan en horisontell linje på tunnelgolvets nivå och nivåkurvan för 1 meters sänkning. Från den punkten sprider sig påverkansområdet av någon icke angiven anledning vertikalt upp mot markytan och dessutom ner i berggrunden. En diskussion av metoden finns i bilaga 7.

Påverkansområde i berg - förtydligande

I berg avses gräns för 1 meters grundvattenavsänkning vid tunnelnivå



Aktbil 1, Pärm 1, PM Hydrogeologi, sid 11, figur 3.3. Kompletterad figur.

Om TRV anser att deras beräkningar i [3] visar att grundvattenbildningen räcker för att upprätthålla grundvattenytan och att det enda kvarvarande som kan orsaka skador på fastigheter och natur är ändringar i grundvattnets trycknivå borde påverkansområdet avgränsas av nivåkurvan för 1 m sänkning vilken är markerad i figuren ovan. Nivåkurvan når aldrig marknivå och resonemanget skulle i praktiken reducera sakägarkretsen till de som har djupborrade brunnar som når under nivåkurvan. Så långt har man dock inte drivit metoden även om det vore mer logiskt än att införa en vertikal spridning från skärningspunkten enligt ovan.

Konsekvenser av TRV:s beräkningsmetod för påverkansområdet

TRV har inte gett något svar på frågan hur en sänkning av grundvattnets trycknivå vid tunnelgolvet påverkar natur och fastigheter nära grundvattenytan där ingen sänkning av trycknivå sker.

MMD har ignorerat DLV:s invändningar mot kriteriet. MÖD och HD har inte givit prövningstillstånd. I både MMD och MÖD är de tekniska råden hydrogeologer, väl kapabla att förstå överklagandet om de läst det. TRV:s beräkningsmetod bör nu kunna tillämpas av alla som i Sverige sysslar med tunneldrivning under grundvattenytan.

Konsekvenser av metoden diskuteras i bilaga 7 där det visas att påverkansområdet beräknad med TRV:s metod för en oinjekterad tunnel i homogent isotropt berg är helt oberoende av konduktivitetens storlek d.v.s. oberoende av om tunneln byggs i mycket tätt berg eller i berg som läcker som ett såll.

För en tunnel med injekteringszon styrs trycknivåns nivåkurvor och därmed påverkansområdet av relationen mellan bergets och injekteringszonens konduktiviteter, inte av deras storlek. Exempeltunneln i [2], fig. 3.3, där bergets konduktivitet är 10^{-7} m/s och injekteringszonen 5% av bergets får samma påverkansområde som en tunnel där båda konduktiviteterna är t.ex. 10 gånger så stora och där 10 gånger mer vatten per tidsenhet rinner in i tunneln.

I bilaga 7 visas hur man med TRV:s metod skulle kunna minimera påverkansområdet till tunnelns bredd plus 10 meter utan att någon kan anföra legala invändningar.

Vattenbalans

Beräkning av inläckage med analytiska formeln respektive tvärsnittsmodellerna

I beräkningsbilagan [3], avsnitt 3.1, anges att tvärsnittsmodellerna ger god överensstämmelse med den där angivna analytiska formeln för inläckage när man sätter skinfaktorn till 1,5 - 2,5. Formeln citeras nedan och diskuteras tillsammans med andra formler i bilaga 9.

$$q = \frac{2\pi K_i H L}{\ln\left(\frac{r+t}{r}\right) + \frac{K_i}{K_b} \ln\left(\frac{2H}{r+t}\right) + \frac{K_i}{K_b} \xi}$$

Cementinjektering i hårt berg.

(Magnus Eriksson och Håkan Stille. SveBeFo 2005)

Eftersom tvärsnittsmodellerna inte har med någon skinfaktor vore det rimligare att jämföra med formelns värde när skinfaktorn sätts till 0.

Vidare gäller formeln ett cirkulärt tunnelrör med radien r medan huvudtunnlarna omfattar två rektangulära tunnelrör med måtten 15x10 m vartill eventuella ramptunnlar och arbetstunnlar tillkommer. I beräkningsbilagan anges inte hur tunnelradien valts vid tillämpning av formeln.

Inte heller beskrivs hur stor avvikelsen är mellan tvärsnittsmodellernas och formelns värde eller hur hänsyn tagits till de torra modellcellerna som nämns i avsnitt 3.2 i [3]. Inte heller anges om den goda överensstämmelsen gäller vid ansatt grundvattenbildning 0,1 eller 0,2 m/år.

Eftersom en rad frågor om de hydrogeologiska beräkningarna är oklart redovisade i [3] och överklagandena från DLV inte beaktats av mark- och miljödomstolarna kan grova fel i redovisningen av vattenbalansen ha passerat ogranskat.

En diskussion av olika formler för beräkning av inflödet i tunnlar finns i bilaga 9. Där visas att om radien i formeln ovan väljs som i [6] utifrån tunnelns tvärsnittsarea kan inflödet i huvudtunnlarna underskattas med en tredjedel.

Vattenöverskott och vattenunderskott i tvärsnittsmodellerna

I tvärsnittsmodellerna ansätts dels en grundvattenbildning på 0,1 m/år i modellens överkant (grundvattenytan) på hela modellbredden 5000 m, dels en drän över hela överytan som tar hand om överskottsvatten. Per meter tunnel och år tillförs alltså i beräkningsmodellen 500 m³ vatten medan beräknat inflöde i tunneln enligt fig. 3.3 i [2] är 63 m³. Med andra ord får dränen föra bort 87% av den ansatta grundvattenbildningen.

I 3.4 i beräkningsbilagan kan man läsa:

”Modellen är alltså inte tänkt att simulera grundvattenflöden in och ut ur modellen likt en vattenbalans. Istället representerar modellen förhållande med ett visst vattenöverskott vid markytan, analogt med den konceptuella modell som beskrivs i avsnittet rörande vattenbalans.”

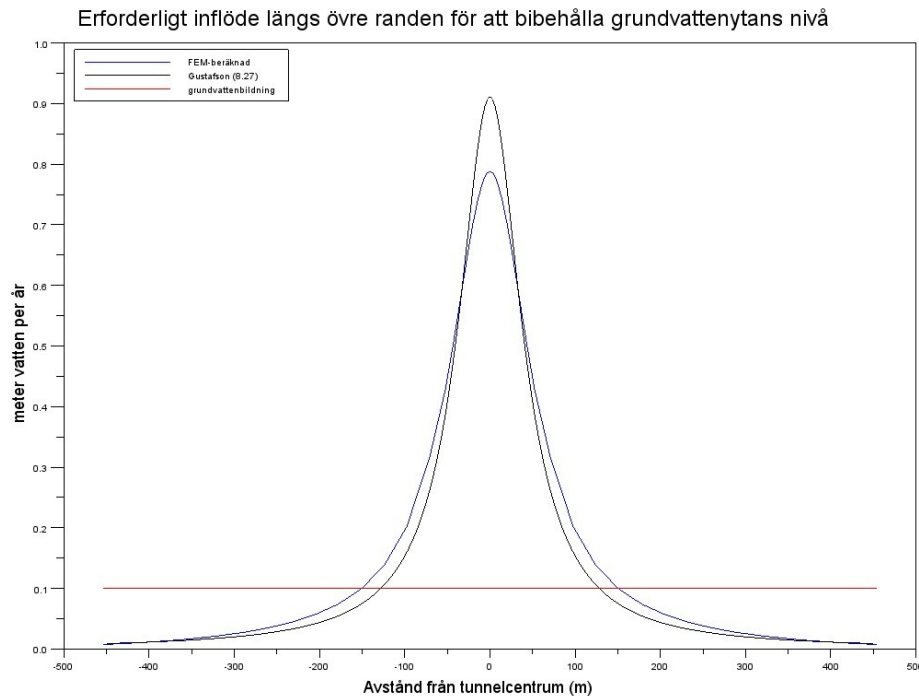
Trots att modellen sägs representera förhållande med ett visst vattenöverskott får man problem i beräkningsprogrammet med torra modellceller vilket skylls på en viss vattenbrist i modelluppbyggnaden, se avsnitt 3.2 i [3]. Man uppger att det gör att inläckaget kan vara något underskattat, vilket sägs ha tagits med i bedömningen. Hur stort underskottet är och hur det tas med i bedömningen anges inte.

Vid torra modellceller har den ansatta grundvattenbildningen dubblerats till 0,2 m/år, se 3.5.1 i [3]. Om det löser problemet framgår inte. Den volym som tas om hand av dränen torde samtidigt i stort sett dubblas och då utgöra ca 94% av den tillförda.

En troligare orsak till de torra beräkningscellerna är att upprätthållandet av grundvattenytan kräver en stor variation av inflödet vid grundvattenytan vilket visas nedan.

FEM-beräknad huvudtunnel

I avsaknad av en analytisk lösning för en tunnel med injekteringszon görs en numerisk beräkning med ett FEM-program [23]. I bilaga 6 beräknas huvudtunneln med två tunnelrör om vardera 15x10 meter.



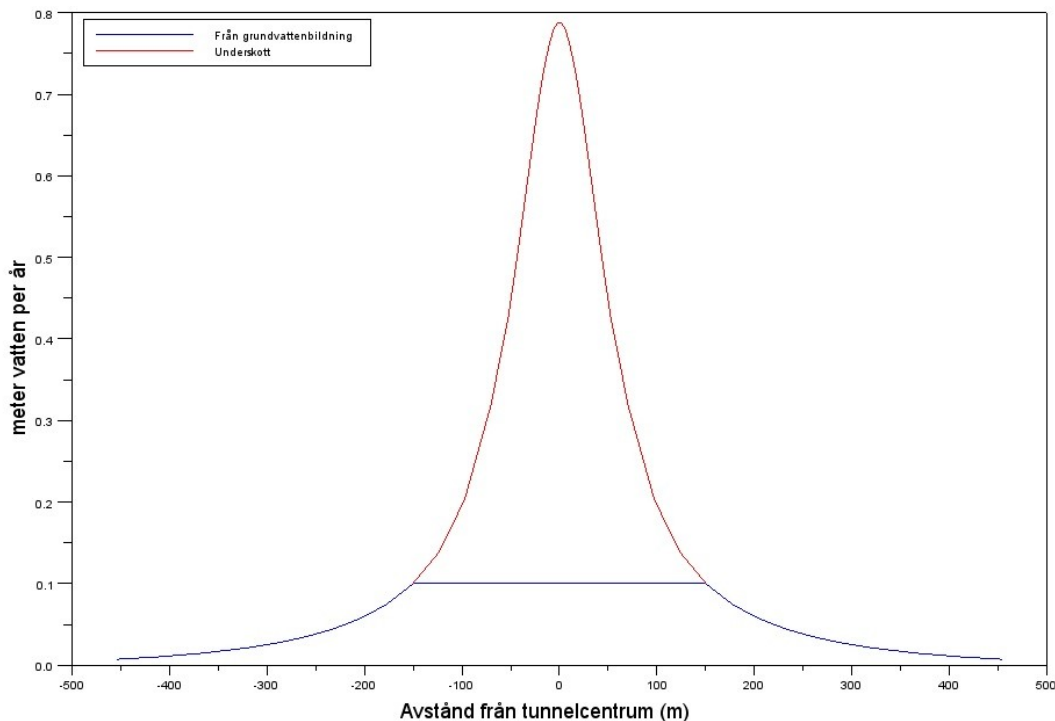
Diagrammet ovan visar FEM-beräkningens resultat för den vertikala inströmningen vid grundvattenytan, $q_z = q_z(x, 0)$. Ansatt grundvattenbildning 0,1 m/år visas med en horisontell röd linje.

I diagrammet finns även motsvarande kurva enligt formlerna (8.5), 8(7) och (8.27) i [6]. Därvid har tunnelradien valts så att tunnelperiferin bibehålls d.v.s. $r = \text{omkretsen} / (2 \cdot \pi) = 100 / (2 \cdot \pi) = 15,9$ m. Som framgår av diagrammet ovan finns ett vattenöverskott vid avstånd över ca 150 m från tunnellen. I TRV:s tvärsnittsmodeller dräneras överskottet bort. Närmare än ca 150 m blir det ett underskott eftersom den ansatta grundvattenbildningen underskrider vad som krävs för att bibehålla

grundvattenytans läge.

Situationen förtydligas i nedanstående diagram där det tillförda vattnet visas med den blå kurvan. Den röda kurvan mätt från nivån 0,1 m visar underskottet. Om man i stället ansätter 0,2 m grundvattenbildning flyttas den horisontella blå linjen uppåt och underskottet minskar.

Inflöde och underskott längs övre randen vid ansatt grundvattenbildning 0.1 m/år



Vid tunneln linjen skulle man enligt FEM-beräkningen behöva ansätta nästan 0,8 m/år för att täcka maximala inflödet. Med den ansatta grundvattenbildningen 0,1 m/år måste över 60% av det erforderliga inflödet täckas med infiltration och/eller tas från grundvattenmagasinet.

Trafikverket har räknat på hundratals tvärsnittsmodeller med olika tunneldjup och konduktiviteter. Om data för den tunnel som visas i fig. 3.3 i [2] är något så när representativa måste slutsatsen bli att långa sträckor utmed tunneln linjen måste infiltreras, något som TRV inte räknat med eftersom de kommit fram till en positiv vattenbalans i kapitel 2 i [3].

Utan infiltrering av vatten kommer grundvattenmagasinet successivt att tömmas och grundvattenytan sjunker. Den sjunkande grundvattenytan minskar visserligen tömningstakten och leder samtidigt till att grundvatten från angränsande områden strömmar till. Det är svårt att beräkna om ett jämviktsläge nås innan grundvattenytan når tunnelgolvet nivå såsom antas i [15]. Problem med konvergens vid olinjära modellberäkningar skildras i [11].

Övriga synpunkter på TRV:s hydrogeologiska beräkningar

Frågor som kommit fram under DLV:s granskning av de hydrogeologiska beräkningsmetoderna behandlas mer detaljerat i bilagorna:

I bilaga 1 behandlas grunderna för grundvattenströmning enligt Darcys lag, speciellt definitionen av ordet trycknivå och varför vi valt det i denna skrift.

I bilaga 2 presenteras en analytisk lösning för exempeltunneln i fig 3.3 i [2] utan injektering.

I bilaga 3 behandlas grunderna för numeriska lösningar med finita elementmetoden (FEM).

I bilaga 4 presenteras en FEM-lösning för exempeltunneln utan injektering för jämförelse med bilaga 2.

I bilaga 5 presenteras en FEM-lösning för exempeltunneln med injektering.

I bilaga 6 presenteras en FEM-lösning för Förbifartens huvudtunnlar med injektering.

I bilaga 7 diskuteras TRV:s beräkningsmetod ("algoritm") för bestämning av påverkansområdet och hur den kan missbrukas för att minimera påverkansområdet.

I bilaga 8 granskas TRV:s grundvattenmodellering i beräkningsbilagan [3].

I bilaga 9 diskuteras olika formler för inläckage som anges i svensk facklitteratur tillsammans med en diskussion av hur val av parametrar vid tillämpning på icke-cirkulära tunneltvärsnitt bör göras.

I bilaga 10 redovisas kortfattat ett helt annat betraktelsesätt på hur påverkansområdet skall avgränsas baserat på grundvattenytans sänkning.

Bilaga 11 framför synpunkter på den splittrade terminologin inom i svensk hydrogeologisk litteratur.

Bilaga 12 beskriver hur DLV:s överklagande har bemötts av mark- och miljödomstolarna och av TRV.

Sammanfattning

Under DLV:s granskning av Trafikverkets hydrogeologiska beräkningar har en rad problem upptäckts:

- Oberoende granskning av TRV:s hydrogeologiska beräkningsmetoder för Förbifarten verkar i praktiken vara obefintlig. Remissmyndigheten SGU som framfört synpunkter på påverkansområdet under remissen var inte närvarande vid huvudförhandlingarna i MMD och har inte hörts av sedan dess i ärendet.
- Trafikverkets kriterium för hur påverkansområdet avgränsas saknar relevans och ger orimliga resultat. Metoden kan lätt missbrukas för att ge minimala påverkansområden
- Vattenbalansen tar inte hänsyn till att inströmningen vid grundvattenytan är koncentrerad till området kring tunneln och har en topp som lätt kan överstiga grundvattenbildningen. Om högre tätningsklass inte kan åstadkommas krävs infiltration av vatten för att bibehålla grundvattenytan
- Grundvattenmodelleringen i [3] kapitel 3 innehåller en rad märkliga detaljer och modellörerna verkar inte förstå varför de får vattenbrist trots att modellbredden satts till totalt 5000 m
- TRV har valt att inte besvara DLV:s frågor utan har i stället i inlagor försökt trycka på för att förhindra beräkningsfrågorna att avhandlas i domstol
- Mark- och miljödomstolarna ignorerar kritiska synpunkter på hydrogeologin respektive ger inte prövningstillstånd, allt utan att på något sätt behöva kommentera innehållet i överklagandena
- Terminologin i TRV:s ansökan men också i svenskspråkig hydrogeologisk litteratur är heterogen, termer används flertydigt och ofta utan definition. Problemet har påtalats till Mark- och miljööverdomstolen som inte tycks se något problem i detta

Referenser

- [1] Trafikverkets presentationsmaterial vid huvudförhandling i Mark- och Miljödomstolen dag 2, 2014-09-03. Skriften finns på nätet: http://www.trafikverket.se/PageFiles/158768/dag_tva_del2_webb.pdf
- [2] Trafikverkets PM Hydrogeologi skriven av Anders Berzell, granskad och godkänd av Joakim Onkenhout. Skriften finns på nätet: http://www.trafikverket.se/PageFiles/18100/pm_hydrogeologi.pdf
- [3] Trafikverkets PM Hydrogeologi Bilaga 5 Hydrogeologiska beräkningar skriven av Joakim Onkenhout.
- [4] Trafikverkets ansökan om tillstånd att bortleda grundvatten, utföra anläggningar och därmed sammanhängande åtgärder i samband med byggande och drift av väg E4 Förbifart Stockholm. Skriften finns på nätet, <http://www.trafikverket.se/contentassets/90896553023247b4b481e3bad8e5014b/grundvattenbortledning-yttrande-2012-06-14.pdf>
- [5a] Knutsson, G., Morfeldt, C-O: Grundvatten, teori & tillämpning, 2 uppl. 1995 Svensk Byggtjänst
- [5] Knutsson, G., Morfeldt, C-O: Grundvatten, teori och tillämpning, 3 uppl. 2002 Svensk Byggtjänst
- [6] Gustafson, G. (2009): Hydrogeologi för bergbyggare, Formas
- [7] Eriksson, M., Stille, H. (2005): Cementinjektering i hårt berg, SveBeFo
- [8] Olofsson, B. (1991) Impact on groundwater conditions by tunnelling in hard crystalline rocks. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan. Doktorsavhandling institutionen för mark- och vattenteknik.
- [9] Rehbinder, G. (1995): Grundvattenströmningens teori. Vattenbyggnad, KTH
- [10] Barkels, D. Silva Parra, A.: (2010): Analys över inläckage av grundvatten till Förbifart Stockholm för deltunnel under Lovö, Mark- och Vattenteknik, KTH
Skriften finns på nätet, http://www2.lwr.kth.se/Publikationer/PDF_Files/LWR_Kand_10_06b.pdf
- [11] Cederström, E., Gjers, A, Kullerstedt, O., Nilsson, M. (2012): Grundvattenavsänkning vid tunnelbyggnad – tillämpning Förbifart Stockholm. CTH, Institutionen för bygg- och miljöteknik
Skriften finns på nätet, <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/163865.pdf>
- [12] Werner, K., Onkenhout, J., Löf, Å. (2012): Effekter på grund- och ytvattenförhållanden vid grundvattenbortledning från berganläggningar. BeFo Rapport 117
- [13] <http://www.dn.se/ledare/kolumner/jenny-jewert-slutet-pa-den-solkiga-historia-om-ojnareskogen/>
- [14] <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=94&artikel=5954752>
- [15] Carlsson, A, Olsson, T: Vatteninläckning till berganläggningar. Förväntansmodell av influensområde. Tidskriften Byggmästaren nr 11 1978
- [16] Huisman, L. (1972): Groundwater Recovery, MacMillan

[17] Polubarinova-Kochina, P. (1962) Theory of Ground Water Movement, Princeton University Press

[18] Lei, Shizhong (1999): An analytical solution for steady flow into a tunnel

Skriften finns på nätet, <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/990364664.PDF>

[19] Reinius, E. (1962): Vattenbyggnad del 1 Hydraulik

[20] Johanna Ragvald (2012): Ett gruvschakts påverkan på grundvattnets nivå och strömning i det omgivande berget ,

[21] Domenico, P och Schwartz (1998), Physical and Chemical Hydrogeology 2nd ed.

[22] Anna Palm (2011) Utvärdering av programvaror för numerisk simulering av negativa porttryck. Skriften finns på nätet, <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/3163939>

[23] Polivka, R.M., Wilson,E.L. (1976): Determination of Temperatures, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley

[24] https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_head

[25] Dahlblom,O och Olsson, K-G (2010): Strukturmekanik, Studentlitteratur

TRV:s presentationsmaterial vid huvudförhandlingarna i MMD finns tillgängligt på <http://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Dokument/>

DLV:s överklaganden enligt nedan finns tillgängliga på <http://dlv.se/Startsida/Forbifarten.html>

Gustafsson, B., Trygger, C. (2014): Synpunkter på bestämning av påverkansområde vid tunnlarna för Förbifart Stockholm. Insänd till Mark- och Miljödomstolen nov. 2014

Gustafsson, B., Trygger, C. (2015): Komplettering av synpunkter på bestämning av påverkansområdet vid tunnlar i berg för Förbifart Stockholm från Djurgården- Lilla Värtans Miljöskyddsförening, DLV. Insänd till Mark- och Miljööverdomstolen feb. 2015

Gustafsson, B., Trygger, C. (2015): Yttrande från Djurgården- Lilla Värtans miljöskyddsförening över Trafikverkets överklagande av Mark- och miljödomstolens i Nacka dom i mål M 3346-11 angående tillstånd till grundvattenbortledning för byggande och drift av E4 Förbifart Stockholm. Insänd till Mark- och Miljööverdomstolen april 2015

Bilaga 1

Lösning av grundvattenströmningsproblem baserad på Darcys lag

I mitten av 1930-talet förstod man enligt [21] att problemet att beräkna värmeflödet i en fast kropp och vattenströmning i ett poröst vattenmättat medium har stora likheter. Det största hindret för att förstå analogin mellan dessa problemområden är att inse att temperaturen i ett värmeledningsproblem inte motsvarar grundvattentrycket utan grundvattnets trycknivå.

Värmeledningsproblem har länge studerats av matematiker. Stationära värmeledningsproblem beskrivs av Laplaces ekvation för områden med konstant isotrop konduktivitet.

Innan datorer i kombination med effektiva numeriska metoder blev lättillgängliga var komplex analys det kraftfullaste verktyget för att lösa tvådimensionella potentialproblem.

Med dramatiskt sjunkande datorkostnader och alltmer utvecklade numeriska beräkningsmetoder har dessa tagit över alltmer. De kan även tillämpas på tredimensionella problem. Här skall vi bara betrakta tvådimensionella modeller, tillämpbara för tvärsnitt genom långa tunnlar.

Det är inte svårt att hitta invändningar mot beräkningsmetoden. Berg är inte ett poröst material, vi vet för lite om bergets egenskaper, sprick och krosszoner m.m. Referensen [6] behandlar sådana frågor. Vi lämnar detta till andra att utreda och sysslar här bara med de rena beräkningsmetoderna.

Stationär lösning

När man torrlägger en tunnel får man först en transient (tidsberoende) grundvattenströmning kring tunneln som klingar ut och med tiden övergår i en stationär (tidsberoende) fas. Det är den senare som studeras nedan. Inflödet av vatten i jorden (grundvattenbildningen) är beroende av årstids- och årsvariationer men de försummas och man räknar med genomsnittsvärden.

Grundvattnets trycknivå

Grundvattnets trycknivå är ett centralt begrepp i samband med modellering av grundvattenströmning baserad på Darcy's lag. På engelska heter det oftast *hydraulic head* eller *piezometric head* [24]. På svenska finns ett otal termer för begreppet, se nedan, varav vi valt ordet trycknivå.

Innan man kan bestämma trycknivån i en punkt måste man först ha valt ett horisontellt referensplan med vertikal, uppåtriktad z-axel. Referensplanet är förstås gemensamt för alla punkter i beräkningsområdet. Därutöver måste man känna

- punktens höjd över referensplanet
- porvattentrycket i punkten

Vid grundvattenytan är porvattentrycket definitionsmässigt lika stort som atmosfärstrycket som ju motsvarar ca 10 m vattenpelare. Trots det säger man att porvattentrycket är noll där. Termen porvattentryck används alltså i stället för porvattnets övertryck jämfört med atmosfärstrycket. På engelska talar man om *gauge pressure*.

Punktens höjd z över referensplanet kallas lägespotential (på engelska *elevation head*)

Att referensplanet kan väljas fritt kan förvåna men det är skillnaderna mellan olika punkters trycknivåer som är avgörande för grundvattenströmningen. En konstant adderad till samtliga punkters elevation head och därmed till deras trycknivå försvinner när man bildar skillnader mellan punkternas trycknivåer.

Porvattentrycket i punkten räknas om till meter vattenpelare genom att dividera trycket (N/m^2) med vattnets tyngd per volymsenhet (N/m^3), ibland kallad tunghet, varvid man får sorten meter.

Resultatet kallas tryckpotential (på engelska *pressure head*) som alltså är $p/(\rho_w * g)$ där

- p = porvattentrycket (N/m^2) och räknas som positivt vid tryckspänning
- ρ_w är vattnets densitet (kg/m^3)
- g är jordaccelerationen (m/s^2)

Trycknivån h i en punkt är alltså summan av läges- och tryckpotentialen, $h = z + p/(\rho_w * g)$ och mäts i meter om man använder sorter enligt SI.

Det är helt nödvändigt att förstå begreppet trycknivå när man anger randvillkor för grundvattenmodeller baserade på Darcys lag.

När det i diagrammen från FEM-beräkningar nedan anges att det är temperatur som visas beror det på att programmet är tänkt för värmeledning, det skall uppfattas som trycknivå (hydraulic head)

Trycknivå för det hydrostatiska fallet

För att illustrera begreppet trycknivå betraktar vi det hydrostatiska fallet. Man kan tänka sig en bassäng, H m djup, fylld med sand. Därefter fyller man på vatten till brädden, vattnet fyller ut mellanrummet mellan sandkornen tills sanden är vattenmättad. Inget avlopp är öppet så vattnet strömmar inte.

Först väljer man ett horisontellt referensplan med uppåtriktad z -axel, säg på bassängens bottennivå, H meter under vattenytans nivå.

Betrakta en punkt med z -koordinaten z_1 vars trycknivå skall bestämmas.

Porvattentrycket p är 0 vid vattenytan och ökar linjärt med djupet.

Vid vår punkt är porvattentrycket $p_1 = \rho_w * g * (H - z_1)$

Trycknivån i punkten blir då enligt ovan $h_1 = z_1 + p_1/(\rho_w * g)$ och med p_1 enligt ovan insatt får man att $h_1 = H$ meter oberoende av z_1 trots att vattnets portryck ökar linjärt med djupet. Detsamma gäller för alla punkter i området.

Om man i stället hade valt referensplanet att sammanfalla med vattenytan så hade trycknivån blivit 0 (noll) för alla punkter i bassängen.

Det går alltså inte att tala om trycknivå förrän man har definierat ett referensplan.

Darcys lag, konstant isotrop konduktivitet

Darcys lag (Henry Darcy 1856) ger ett samband mellan vattnets flödeshastighetsvektor $\mathbf{q}$, ibland kallad Darcyhastigheten, och gradienten av grundvattnets trycknivå.

Om materialet är isotropt (har samma egenskaper i alla riktningar) gäller då att flödeshastigheten är $\mathbf{q} = -k \cdot \text{grad}(h)$

Konstanten k kallas den hydrauliska konduktiviteten och är beroende bl. a. av hur finkornigt materialet är och anges i m/s.

I ett kartesiskt koordinatsystem är gradienten av h en vektor med de partiella derivatorna som komponenter

$$\text{grad}(h) = [\partial h / \partial x, \partial h / \partial z]^T$$

Kontinuitetsekvationen

Kontinuitetsekvationen för en stationär (tidsoberoende) situation att det som strömmar in i en liten kontrollvolym också strömmar ut. Det skapas inget eller försvinner inget vatten i kontrollvolymen.

Matematiskt uttrycks kontinuitetsekvationen för en inkompressibel vätska som att divergensen av $\mathbf{q}$ är noll, $\text{div}(\mathbf{q}) = 0$

I ett kartesiskt koordinatsystem är divergensen av flödesvektorn $\mathbf{q}$

$$\text{div}(\mathbf{q}) = \partial q_x / \partial x + \partial q_z / \partial z$$

om komponenterna av $\mathbf{q}$ betecknas q_x och q_z i horisontell respektive vertikal riktning.

Laplaces ekvation

Om man sätter in Darcys lag i kontinuitetsekvationen får man

$$\text{div}(\mathbf{q}) = \text{div}(-k \cdot \text{grad}(h)) = -k \cdot \text{div}(\text{grad}(h)) = 0$$

Eftersom högerledet = 0 kan man dividera bort k från ekvationen som övergår till Laplaces ekvation som i ett kartesiskt koordinatsystem kan skrivas $\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial z^2 = 0$

Randvillkor

Laplaceekvationen skall lösas på det valda området med uppfyllandet av randvillkor på trycknivån h eller på dess derivata vinkelrätt mot modellranden.

Eftersom det finns datorprogram som löser Laplaces ekvation blir den viktigaste uppgiften för modellören att ge korrekta randvillkor till programmet.

Ovanstående är ytterst summariskt och det finns gott om litteratur för den matematiskt intresserade.

Matematiska lösningar av Laplaces ekvation med randvillkor ger h som en explicit funktion av x och z . Funktionen kan då deriveras med avseende på x och z så att man får analytiska uttryck för trycknivåns gradient varefter flödesvektorn $\mathbf{q}$ lätt kan beräknas.

Vid numeriska lösningsmetoder får man trycknivån h i diskreta punkter varur man genom interpolation kan beräkna närmevärden på h och dess partiella derivator i valfria punkter.

Eftersom vi här bara hanterar tvådimensionella fall kan trycknivån h illustreras med nivåkurvor analogt med nivåkurvor för höjden på en topografisk karta.

Bilaga 2

Analytiska lösningar för en tunnel i poröst material

Den ryska matematikern Polubarinova-Kochina gav 1952 ut en omfattande bok med analytiska lösningar på grundvattenströmningsproblem. Boken kom ut i översättning till engelska 1962 [17].

En av lösningarna behandlar problemet med en tunnel i poröst material under en vattenyta, t.ex. en sjö. Lösningen presenterades med två formler:

- totala inflödet över modellens övre rand som är detsamma som inflödet i tunneln
- trycknivån som funktion av koordinaterna x och z i modellområdet.

Shizhong Lei presenterade 1999 en förbättring av lösningen i [18] kompletterad med en formel för strömfunktionen ψ som funktion av x och z .

För strömfunktionen gäller att $\partial \psi / \partial z = \partial h / \partial x$ och $\partial \psi / \partial x = -\partial h / \partial z$ vilket gör att nivåkurvor för ψ är vinkelräta mot $grad(h)$. I ett isotropt material utgör de strömlinjer d.v.s. visar vilken bana en vattenpartikel följer i det porösa materialet.

De analytiska lösningarnas förutsättningar

Det är viktigt att beakta de förutsättningar och begränsningar som gäller de presenterade lösningarna i [17] och [18]:

1. tunneln är horisontell och har cirkulär tvärsektion
2. tunneln befinner sig i ett halvplan vars enda gräns är överytan
3. det omgivande markmaterialet är vattenmättat, homogent, isotropt och poröst
4. lösningen avser stationär (ej tidsberoende) strömning
5. modellens överyta har konstant trycknivå
6. hela tunnelperiferin har konstant trycknivå (i stället för att variera med djupet)
7. vattnet är inkompressibelt

Punkt 5 är inte minst viktig och i [17] och [18] förutsattes att modellen befinner sig under en sjö e.dyl. vars vattenyta hålls på konstant nivå. Även om inflödet utmed modellens övre rand är ojämnt fördelat så jämnas trycknivån ut automatiskt.

Formlerna i [18] har programmerats, trycknivån och strömfunktionen visas grafiskt i form av diagram på en datorskärm, skärmdumpar visas nedan.

Tolkningen av diagrammen

För varje bildpunkt på skärmen kan man beräkna dess x och z -koordinat i modellen varefter Leis formler för trycknivån respektive strömfunktionen utvärderas. Beroende på inom vilket intervall värdet faller väljs färg enligt skalan i figuren mellan vit för högsta och mörkblå för lägsta värdet.

Gränsen mellan två färger utgör då en nivålinje d.v.s. sammanbinder punkter i området med samma värde på trycknivån h respektive strömfunktionen ψ .

I det första exemplet nedan är högsta värdet på trycknivån -0,002 m och den minsta -45,24 m.

(att det minsta värdet inte är exakt -45 m kan förklaras av att den cirkulära tunnelperiferin approximeras med en polygon varvid även bildpunkter något närmare tunnelns centrum än tunnelradien kan komma med och utvärderas med formeln).

Gränsen mellan det vita och det gula området är nivålinje för -4,526 m etc.

Notera att värdena som anges skall multipliceras med 10^{-3} vilket anges i diagrammet

Analytiskt beräknad trycknivå

Det utsnitt av modellen som visas i fig. 3.3 i PM Hydrogeologi har beräknats. Av symmetriskäl tas bara delen till vänster om tunnelns mittlinje med. Nivålinjerna har valts ekvidistanta så att hela variationen av trycknivå inom området visas. Tunnelns radie har valts till 6,37 m så att tunnelns omkrets stämmer med omkretsen för den kvadratiske tunneln 10x10 meter i fig. 3.3 i [2].



Vattnet strömmar från den horisontella överytan mot tunneln, hela tiden vinkelrätt mot trycknivåns nivåkurvor. I figuren anges inflödet till $1,069 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ och meter tunnel. Värdet avser hela modellen, inte bara det utsnitt som visas i figuren.

Analytiskt beräknad strömfunktion

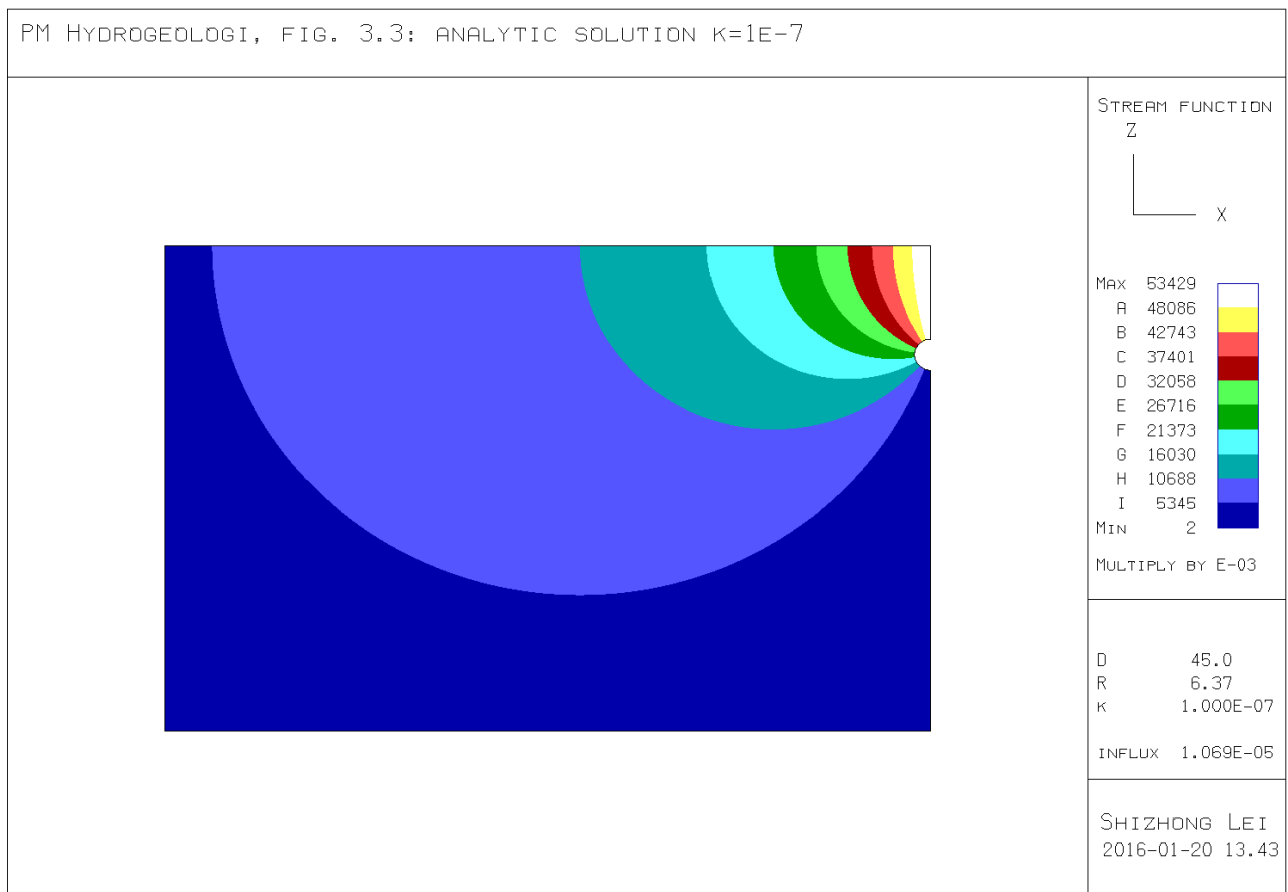
Strömningen kan visas tydligare om man gör ett diagram av Leis formel för strömfunktionen vars nivåkurvor (d.v.s. gränsen mellan två färgade fält) visar strömlinjerna, se nästa bild.

En vattenmolekyl som startar sin färd från grundvattenytan mot tunneln vid överytan på gränsen mellan exempelvis det mörk- och ljusgröna fältet (nivå 26,716) i diagrammet följer gränslinjen i en båge mot tunneln. Detsamma gäller en molekyl som startar sin färd på gränsen mellan det mörkgröna och turkosa området (nivå 21,373).

De färgade fälten fungerar som "strömrör" och en vattenmolekyl som startat i ett strömrör är kvar i det hela vägen fram till tunneln.

Det som under en tidsenhet strömmar in i ett strömrör vid grundvattenytan skall hinna ut i samma takt vid tunneln där strömröret är smalare. Därför måste hastigheten öka ju närmare tunneln man kommer. Flödesvektorn är enligt Darcy $\mathbf{q} = -k \cdot \text{grad}(h)$ med sorten m/s.

Eftersom k förutsätts konstant i den analytiska lösningen måste beloppet av gradienten för trycknivån h bli allt större ju närmare tunneln man kommer. De ekvidistanta nivåkurvorna för trycknivån kommer därför allt tätare ju närmare tunneln man kommer vilket bekräftas av föregående diagram.



Totala inflödet av vatten vid modellens överyta

I figuren nedan anges totala inflödet av vatten vid modellens överyta, vilket är detsamma som inflödet i tunneln eftersom beräkningen avser stationär strömning. I figuren anges det till $10,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ och meter tunnel (eftersom vi valt sorterna m och s). Trots att modellens överyta sträcker sig obegränsat till vänster och höger om tunnelns mittlinje så blir det totala inflödet ändå begränsat.

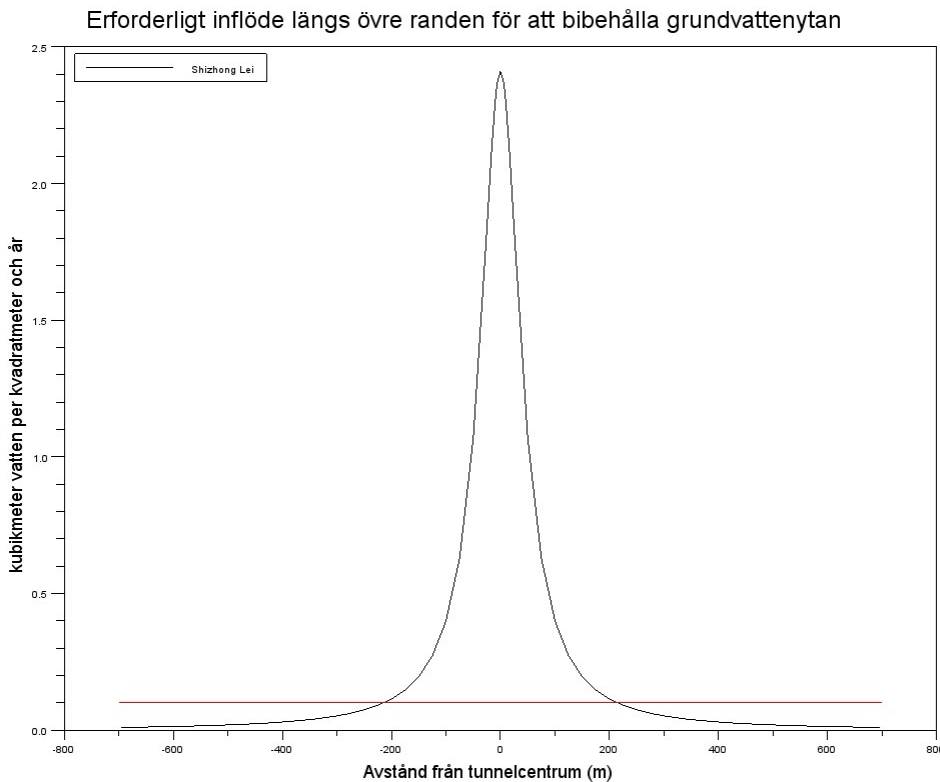
Fördelningen av inflödet utmed modellens överyta

När man anger att trycknivå skall vara noll vid modellens övre rand innebär det samtidigt att man angett att grundvattennivån skall bibehållas där. Det medför ett krav på att ersätta det vatten som flödar in över randen. Inflödet varierar kraftigt utmed randen.

Ur Leis formel för trycknivå $h = h(x,z)$ kan man beräkna ett uttryck för trycknivåns gradient vid modellens överyta. Komponenten i x-led blir noll medan komponenten i y-led varierar med avståndet från tunneln.

Den vertikala flödet ned i markytan erhålls som $k \cdot \text{grad}(h)$ d.v.s. genom att multiplicera gradientens vertikala komponent $\partial h / \partial z$ med konduktiviteten k .

Resultatet visas nedan där erforderligt inflöde räknats om till m/år för att lättare kunna jämföras med den ansatta grundvattenbildningen 0,1 m/år som markeras med en röd linje i diagrammet.



Utan injektering skulle alltså tunneln i fig. 3.3 i PM Hydrogeologi [2] behöva infiltreras med vatten inom ett ca 200 m brett område på ömse sidor av tunnellen. I annat fall töms grundvattenmagasinet ovanför tunneln.

Bilaga 3

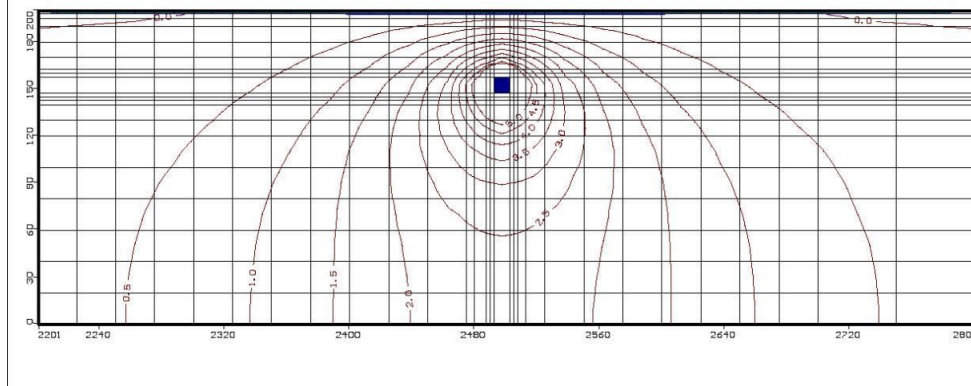
Numerisk lösning av grundvattenströmningsproblem

Laplace's ekvation kan lösas med olika numeriska metoder, t.ex. finita differensmetoden (FDM), finita elementmetoden (FEM) eller randelementmetoden (BEM). Vid numeriska metoder får man närmevärden på trycknivån h i modellens noder varur man genom interpolation kan beräkna värden på h och dess derivator i valfria punkter (x,z) . Tillsammans med den hydrauliska konduktiviteten ger det flödesvektorn $\mathbf{q}$.

Med numeriska metoder kan man dessutom lösa problem med komplicerade geometrier, anisotrop konduktivitet m.m. och på så sätt bättre modellera det aktuella problemet samtidigt som man måste beakta att lösningen är approximativ.

Rekonstruktion av Trafikverkets exempeltvärnsnitt med FEM

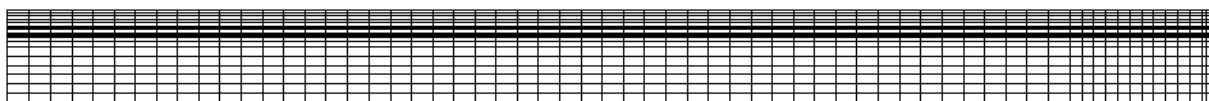
I PM Hydrogeologi beräkningsbilagan [3] finns nedanstående diagram som fig. 13 som också förekommer som fig. 3.3 i [2]. Den är utgångspunkt för den bild som förklarar hur TRV beräknar påverkansområdets utbredning såsom visades under huvudförhandlingarna i september 2014.



Figur 13. Grundvattenpåverkan kring en 10 x 10 meters tunnel 50 m under markytan med bergkonduktivitet, $K_b 10^{-7}$ m/s och konduktivitet för tätad zon, $K_i 5 \times 10^{-9}$ m/s.

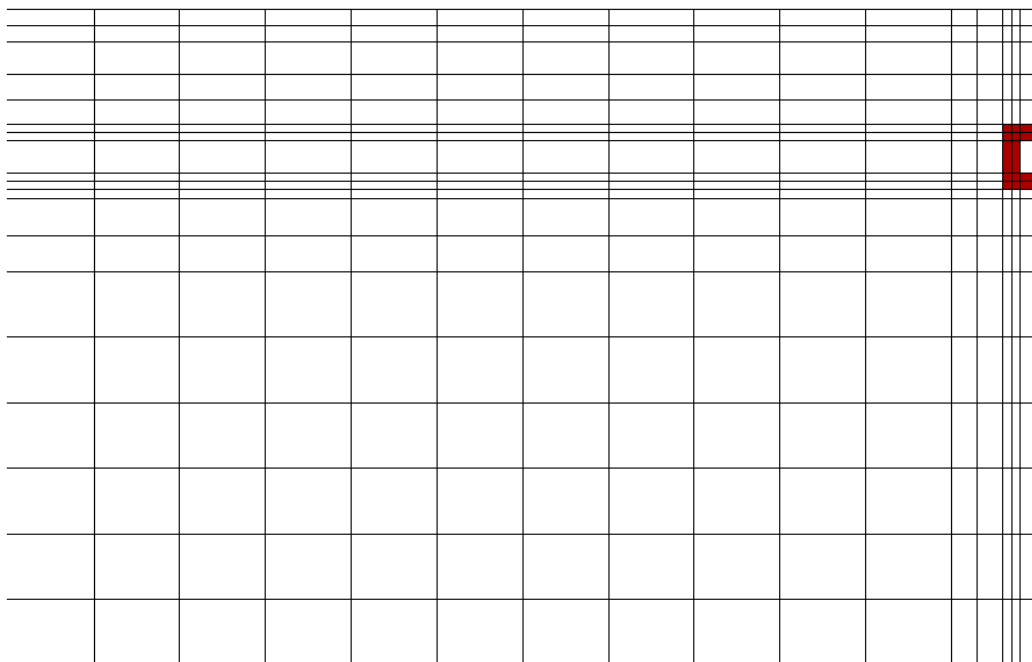
Trafikverket har använt ett beräkningsprogram, Modflow, som bygger på finita differensmetoden.

Genom mätning i figuren ovan konstruerades ett likartat FEM-nät enligt figuren nedan som bör ge likvärdig beräkningsnoggrannhet. Figuren ovan visar bara 300 meter på vardera sidan om tunnelns mittlinje, det modellerade område är totalt 5000 meter med 200 meters djup vilket framgår av PM Hydrogeologi, beräkningsbilagan. [3]. Av symmetriskäl räcker det att modellera halva området kring tunneln. I vår modell nedan befinner sig tunneln i högra kanten.



Tunneln är 10x10 m, dess tak ligger 40 m och golvet 50 m under modellens överyta.
Den injekterade zonen runt tunneln är 5 m tjock modellerad med två finita element à 2,5 m i tjockleksriktningen.

Nedan visas området 300 m närmast tunneln till höger i figuren ovan. Området överensstämmer med vänstra halvan av fig. 3.3 i PM Hydrogeologi. Där har även det område som injekteras markerats.



Randvillkor vid FEM-modellen

FEM-modellens noder har antingen föreskriven trycknivå eller föreskrivet nodflöde (vilket räknas positivt när flödet är riktat in i modellen).

Man kan inte föreskriva både trycknivå och nodflöde i en och samma nod.

Noder där trycknivån är föreskriven ges en randvillkorskod (1 i vårt program),

För de noder där ingen randvillkorskod anges gäller föreskrivet nodflöde.

Därutöver måste värdet i noden på trycknivån respektive nodflödet anges.

Om inget värde på flödet anges för noden förutsätts att flödet in i modellen där är noll.

En sammanhängande rad noder där ingen randvillkorskod och inget nodflöde angivits bildar då en isolerad rand. En konflikt uppstår där en isolerad rand möter en rand med föreskriven trycknivå. För den gemensamma noden väljer man normalt att föreskriva trycknivån.

För noder där man föreskriver trycknivån beräknar programmet det nodflöde som krävs för att upprätthålla den angivna trycknivån.

För noder där flödet föreskrivs beräknar programmet vilken trycknivå som då krävs.

Randvillkor i vårt tunnelproblem

Vi börjar med att välja läget för referensplanet som grundvattenytan, vilken ligger i övre modellranden.

Porvattentrycket p är noll (0) vid grundvattenytan.

Genom vårt val av referensplan är även z noll där, så trycknivån $h = z + p/(\rho_w \cdot g) = 0$ vid överytan.

Vid tunnels periferi är porvattentrycket p också noll (0) så trycknivån $h = z$ d.v.s. punktens nivå under referensnivån. Vid tunneltaket blir trycknivån då -40 m, vid tunnelgolvet -50 m.

Högra vertikala randen av modellen är ett symmetrisnitt d.v.s. ingen strömning sker vinkelrätt mot den, så defaultvärdet i FEM-metoden är rätt.

Vid vänstra vertikala randen och modellens botten känner vi varken flödet eller trycknivån.

Vi förlitar oss på att dessa ränder lagts tillräckligt långt från tunneln för att inte påverka resultatet nämnvärt i modellen och låter dem utgöra isolerade ränder, d.v.s. FEM-metodens defaultrandvillkor gäller.

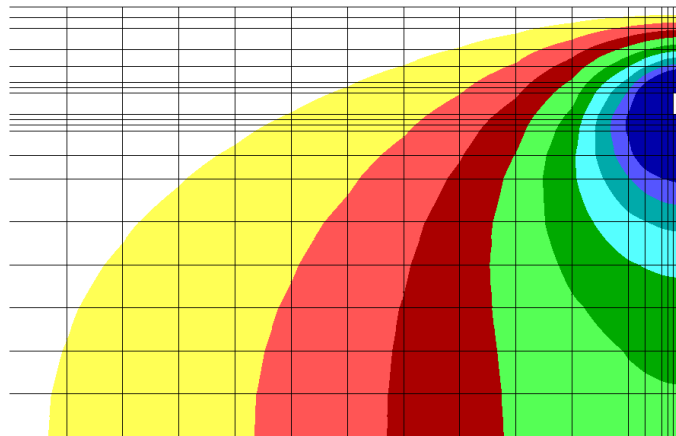
Jämförelse med fig. 3.3 i PM Hydrogeologi

För jämförelse mellan rekonstruktionen av nivålinjerna i fig. 3.3 i [2] visas här FEM-modellens nivålinjer för trycknivån (som gräns mellan de färgade fälten i figuren). Det framgår inte av fig. 3.3 om modellen har basmodellens konduktiva jordlager följt av ett anisotropt berglager innan det isotropa berget tar vid, se 3.x i [3]. Här är jordlagret och det anisotropa berget inte medtaget.

Därunder visas fig. 3.3 från [2] varvid högra halvan skurits bort för att göra figurerna så lätta som möjligt att jämföra. I stort ligger nivåkurvorna lika.

En detalj är värd att notera i TRV:s diagram: vid övre vänstra hörnet faller nollnivån ner en aning. Det kommenteras i bilaga 8.

PM HYDROGEOLOGI FIG 3.3: $K_B=1E-7$ $K_I=0.05E-7$



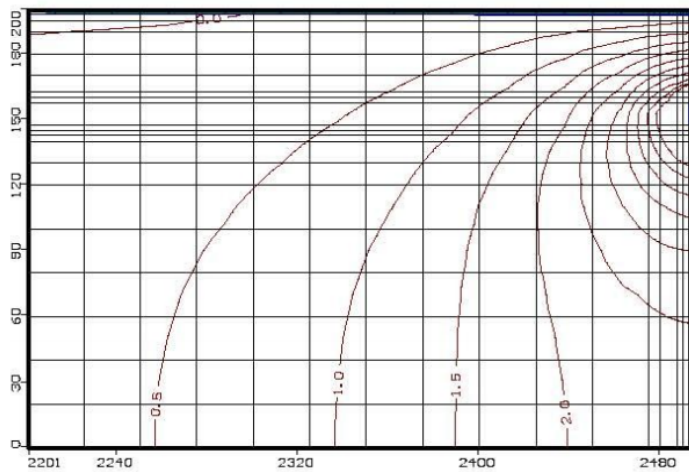
TEMPERATURES



MAX -0
 A -500
 B -1000
 C -1500
 D -2000
 E -2500
 F -3000
 G -3500
 H -4000
 I -4500
 MIN -50000
 MULTIPLY BY E-03

INFLUX 1.001E-06
 OUTFLOW -1.001E-06

TIME STEP = 1
 TIME = 0.0000E+00



Figurerna ovan visar den injekterade tunneln i fig. 3.3 beräknad med ett FEM-program respektive Modflow.

Bilaga 4

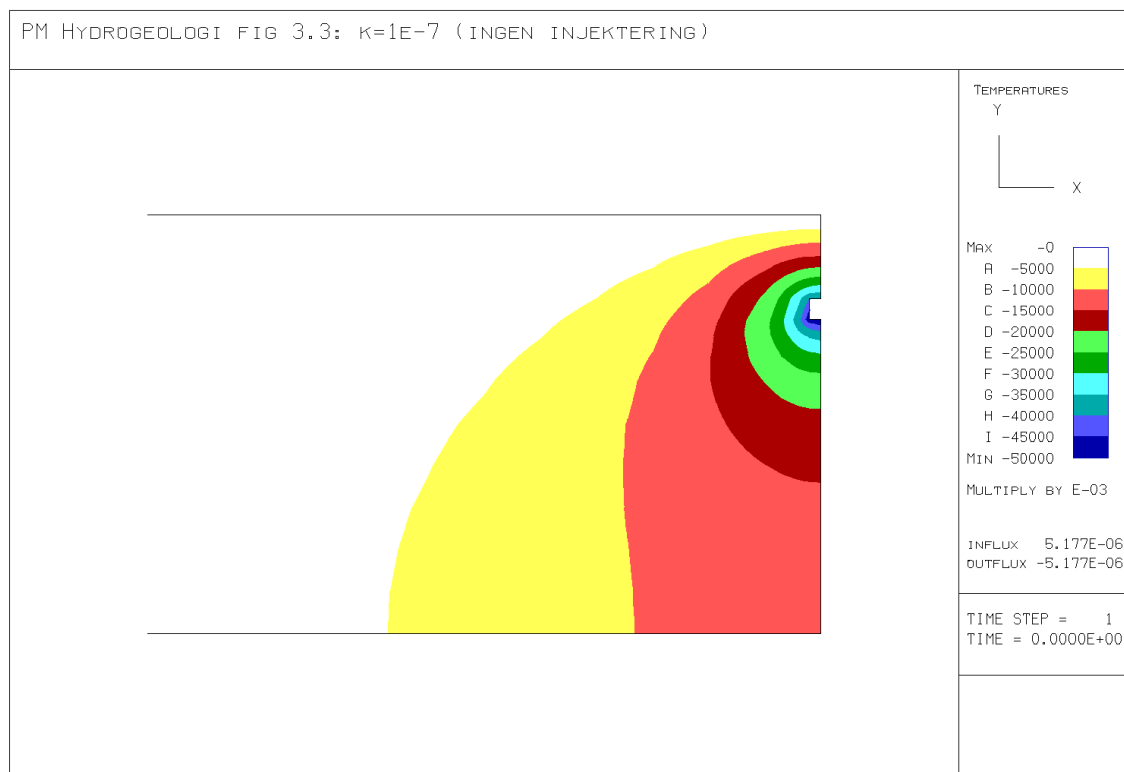
FEM-beräkning av tunnel utan injektering

Beräkningen görs för att visa skillnader mellan den analytiska lösningen enligt bilaga 2 ovan och en lösning av "samma" problem med ett FEM-program.

För FEM-modellen gäller följande jämfört med den analytiska ovan

1. tunneltvärsektionen skall helst vara rektangulär (det är inget strikt krav)
2. beäkningsområdet måste ges en artificiell gräns med randvillkor även på sidorna och nedtill
3. markmaterialet kan vara anisotropt (konduktiviteten olika t.ex. horisontellt resp. vertikalt)
4. konduktiviteten kan variera från element till element
5. tunnelperiferin kan ges varierande trycknivå (vilket är mer korrekt än en konstant trycknivå)
6. noggrannheten i lösningen beror på hur fint FEM-nät man använder

FEM-beräknad trycknivå, oinjekterad tunnel



Man kan jämföra bilden ovan med motsvarande för den analytiska lösningen i bilaga 2.

Notera att nivåkurvorna för trycknivån ansluter vinkelrätt mot den isolerade bottenranden vilket den inte gör i den analytiska lösningen som ju saknar en systemgräns nedtill.

Detta framgår framför allt vid gränslinjen mellan det gula och det ljusröda området ($h = -10$ m)

Den analytiska lösningen har konstant trycknivå kring hela tunnelperiferin, -45 m. I FEM-modellen gäller -40 resp. -50 m med linjär variation utmed den vertikala tunnelväggen såsom vi föreskrivit i indata.

Totala inflödet av vatten över modellens överyta

I figuren ovan anges totala in- och utflödet till modellen vilka har beräknats genom att separat addera alla positiva nodflöden och alla negativa nodflöden från FEM-beräkningen. De positiva nodflödena uppträder vid modellens övre rand, de negativa vid noderna kring tunneln.

Eftersom modellen bara omfattar området till vänster om tunnellen måste värdet dubblas vilket ger $2 \cdot 5,177 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 10,354 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ och längdmeter tunnel. Det är ca 3% lägre än den analytiska lösningen. ovan som ju omfattar hela modellen (och inte bara vänstra halvan).

Huvuddelen av skillnaden beror sannolikt på att FEM-resultatet är approximativt vilket kan förbättras med tätare elementnät. En del kan bero på skillnaderna i tunnelns form. En marginell del av förklaringen är att modellen är totalt 5000 m bred medan den analytiska lösningen omfattar den obegränsat långa marklinjen.

Fördelningen av inflödet utmed modellens överyta

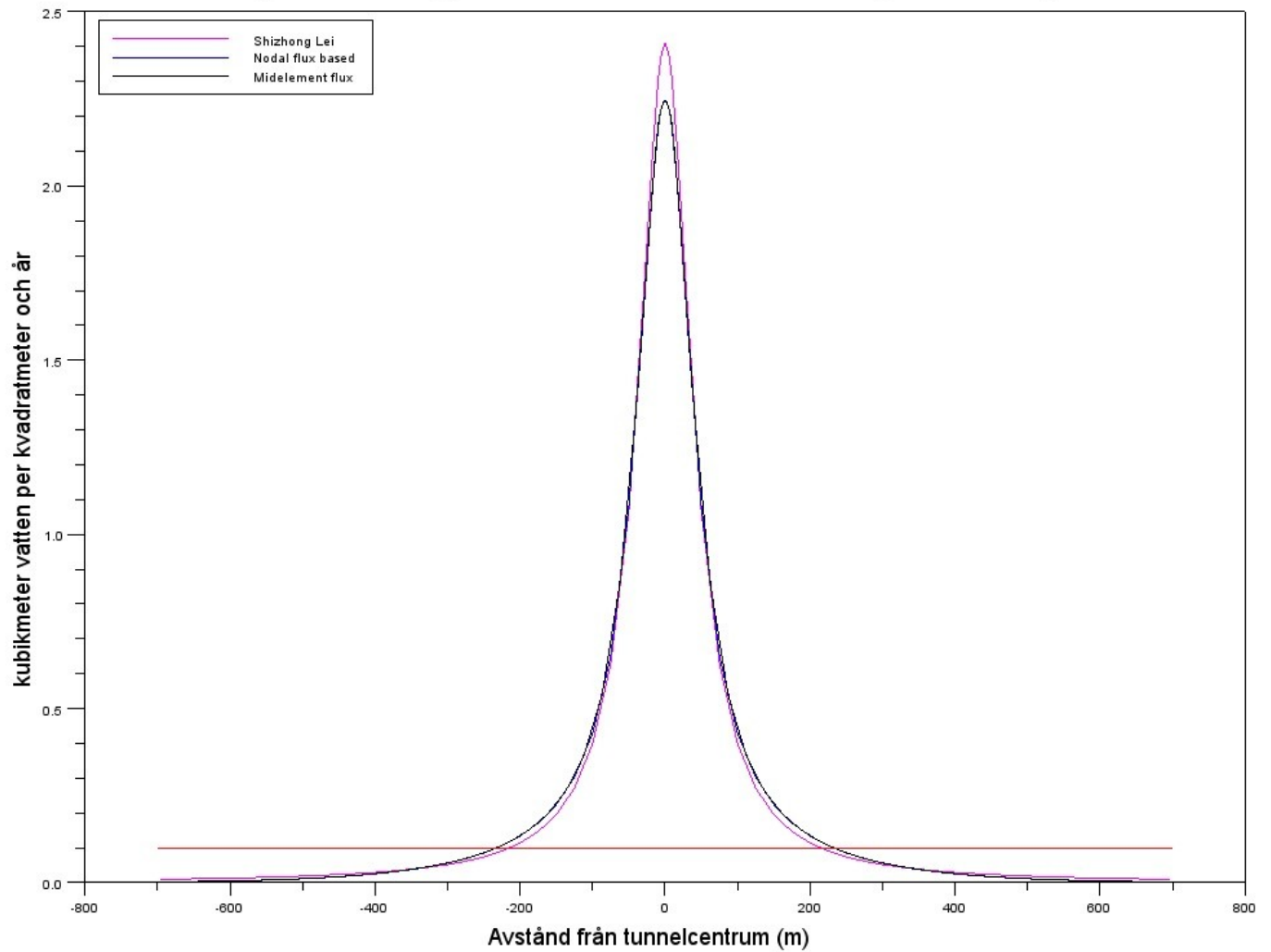
Det vertikala flödets variation utmed grundvattenytan erhålls från FEM-programmet. Programmet beräknar trycknivåns derivata $\partial h / \partial z$ och multiplicerar med konduktiviteten k . Utvärderingen har gjorts i elementens mittpunkter och diagrammet nedan använder värdena för översta elementraden i modellen.

Programutskriften ger också erforderliga nodflöden in i modellen för noder med föreskriven trycknivå vilket ju gäller alla noder i överytan. Genom att vi vet att inflödet är vertikalt vid överytan kan vi ansätta en polygonformad variation av flödet q_z vid övre modellranden och beräkna flödets variationen så att nodflödena stämmer med de datorberäknade. Därigenom fås en kontroll av de beräknade värdet på q_z .

Dessa två sätt att beräkna det vertikala flödet vid övre randen visas nedan och överensstämmelsen är så god att vi framöver bara anger den ena. Den analytiska lösningen visas likaså och den har ett högre maxvärde.

Den ansatta grundvattenbildningen är 0,1 m/år och markeras i diagrammet med en röd horisontell linje. Närmare tunneln än ca. 200 meter räcker den inte till för att upprätthålla grundvattenytan för den oinjekterade tunneln.

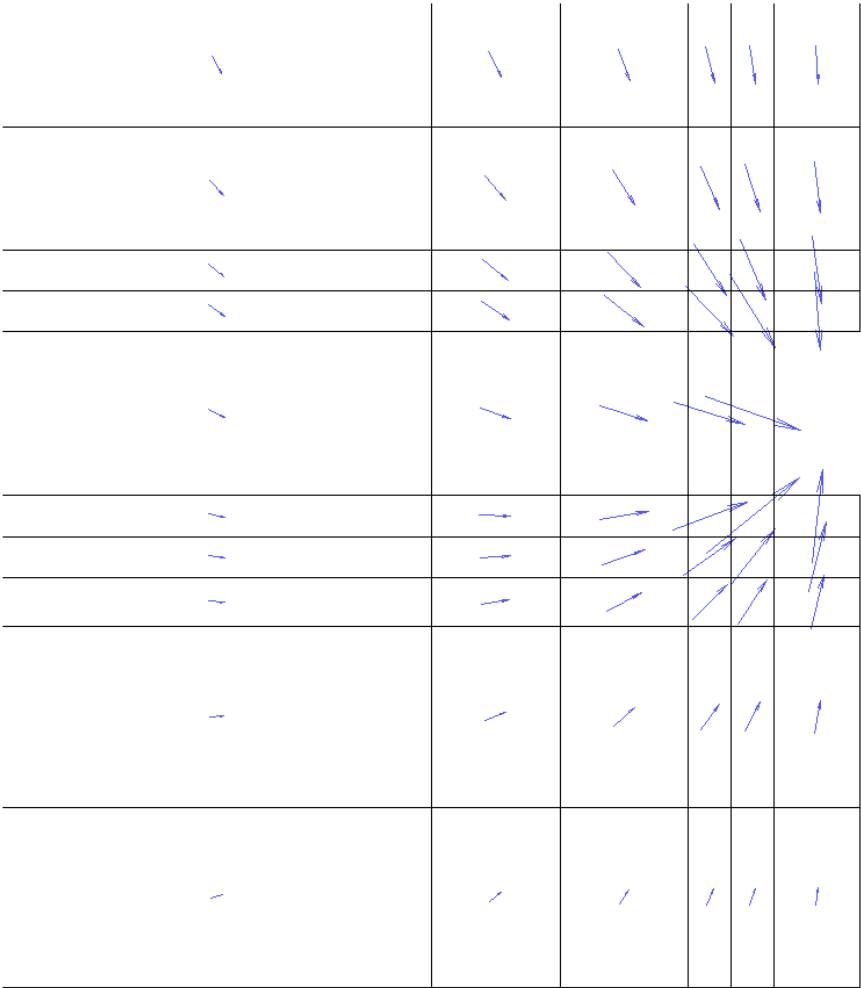
Erforderligt inflöde längs övre randen för att bibehålla grundvattenytan



Grundvattenströmningen kring tunneln

Ett sätt att illustrera grundvattenströmningen är att rita flödesvektorer i elementmitt som pilar vilka visar både storlek och riktning av flödet.

Nedan visas detta i området kring tunneln. Bilden visar tydligt hur vattnet strömmar in mot tunneln från alla håll, inte minst underifrån.



Bilaga 5:

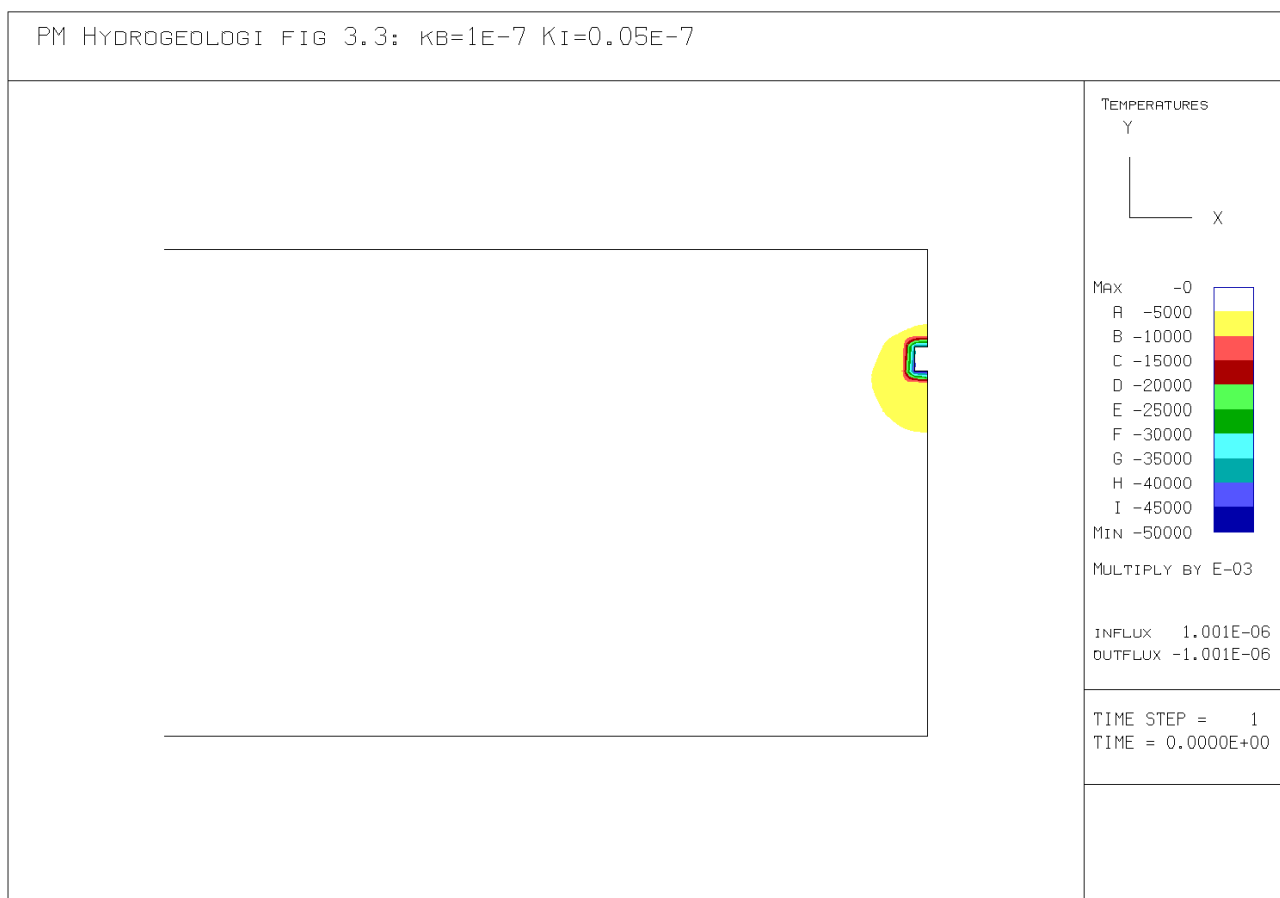
FEM-beräkning av injekterad tunnel enligt fig. 3.3 i [2]

Vi känner inte till någon analytisk lösning för en tunnel med en injekterad zon kring periferin.

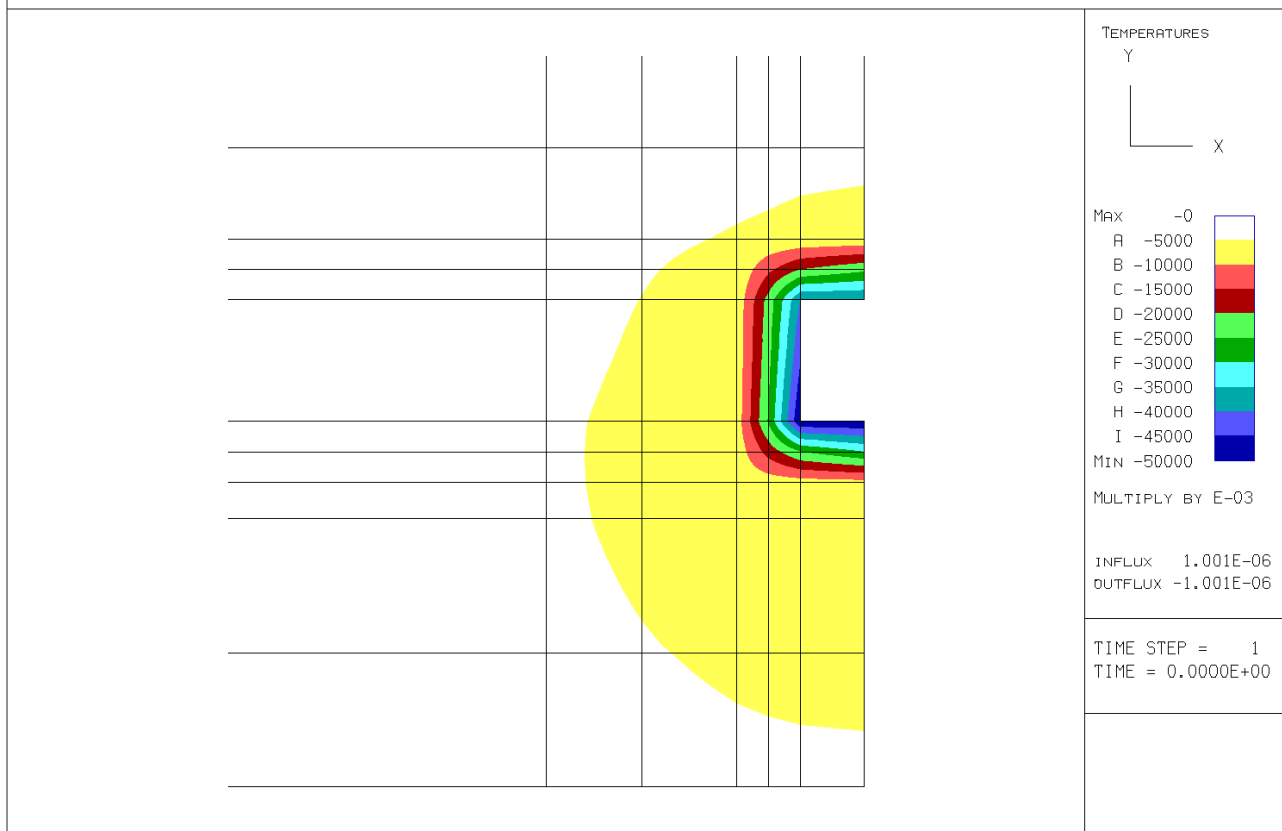
I FEM-modellen har vi på samma sätt som i PM Hydrogeologi gett zonen 20 gånger lägre konduktivitet än bergets. Bergets konduktivitet är då fortfarande $k_b=10^{-7}$ m/s och den injekterade zonen $k_i=0.05 \cdot 10^{-7}$ m/s. Injekteringszonen är 5 m tjock och omfattar två element à 2,5 m kring tunneln, se figuren nedan. Huruvida zonens tjocklek 5 m resp.värdet på de hydrauliska konduktiviteterna k_b och k_i är rimliga kan vi inte bedöma, vi följer här [2] och [3].

FEM-beräknad trycknivå, injekterad tunnel

Resultatet visas med samma val av nivåer som i den analytiska lösningen (alltså ekvidistant).



Om man förstörar området kring tunneln och även lägger in elementnätet får man följande bild som tydligt visar att den allra största delen av trycknivåns fall äger rum i den injekterade zonen:

PM HYDROGEOLOGI FIG 3.3: $K_B=1E-7$ $K_I=0.05E-7$ 

En vattenmolekyl som startar rakt ovanför tunneln hade före injekteringen 40 m berg att passera. Efter injekteringen har den 35m berg och 5 m injekteringszon att passera, den senare motsvarar $20 \cdot 5 = 100$ m berg. Inläckaget rakt ovanifrån borde till följd av injekteringen ändras med faktorn $40/(35+100) = 0,3$.

För andra startpunkter vid ytan är resvägen till tunneln längre och rimligen inverkar injekteringszonen procentuellt mindre än för startpunkten rakt ovanför tunnelcentrum. Men totala inflödet ändras med faktorn $1,001/5,177 = 0,2$, den enkla kalkylen ovan ger inte ett särskilt bra värde.

Totala inflödet av vatten över modellens överyta

I figuren ovan anges totala in- och utflödet till modellen på samma sätt som beskrevs i föregående bild. Värdet $1,001 \cdot 10^{-6}$ m³/s måste dubblas för att visa hela tunnelns inläckage vilket ger $2,002 \cdot 10^{-6}$ m³/s och längd meter tunnel, ca 3% lägre än den "analytiska formeln" som citeras i [3].

Om man hellre vill ha inläckaget i liter per minut och 100 m tunnel skall man multiplicera värdet ovan med $1000 \cdot 60 \cdot 100 = 6 \cdot 10^6$ varvid man får 12 liter per minut och 100 m tunnel.

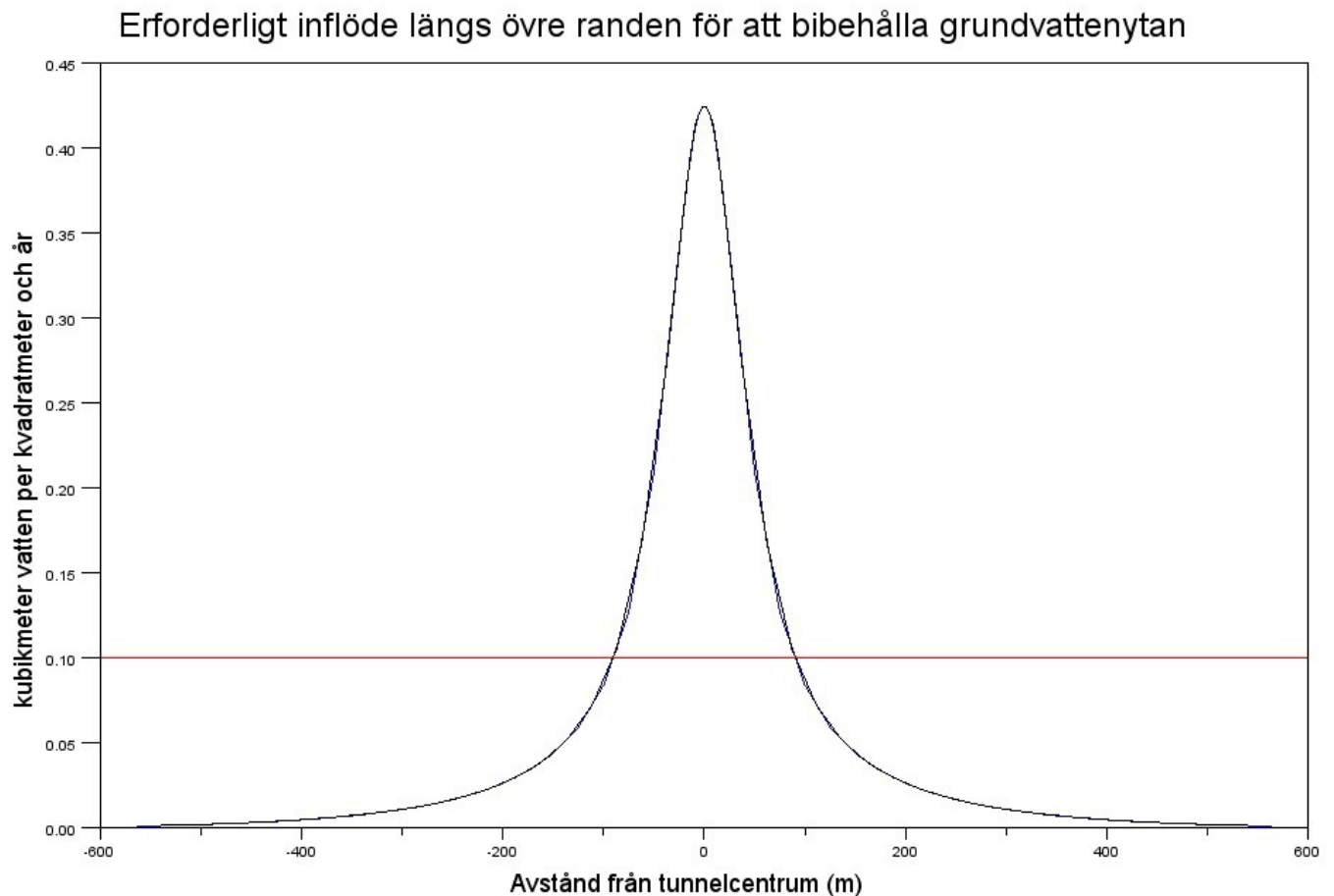
Fördelningen av inflödet utmed modellens överyta

De två sätten att beräkna det flöde över modellens överyta som redovisats ovan visas nedan.

Överensstämmelsen är mycket god, man kan skönja effekten av att den ena kurvans datapunkter hänförs till elementmitt, den andra till elementhörnen (noderna).

Den av TRV ansatta grundvattenbildningen är 0,1 m/år och markeras med en röd horisontell linje.

Närmare tunneln än ca 100 m räcker den inte till för att upprätthålla grundvattenytan

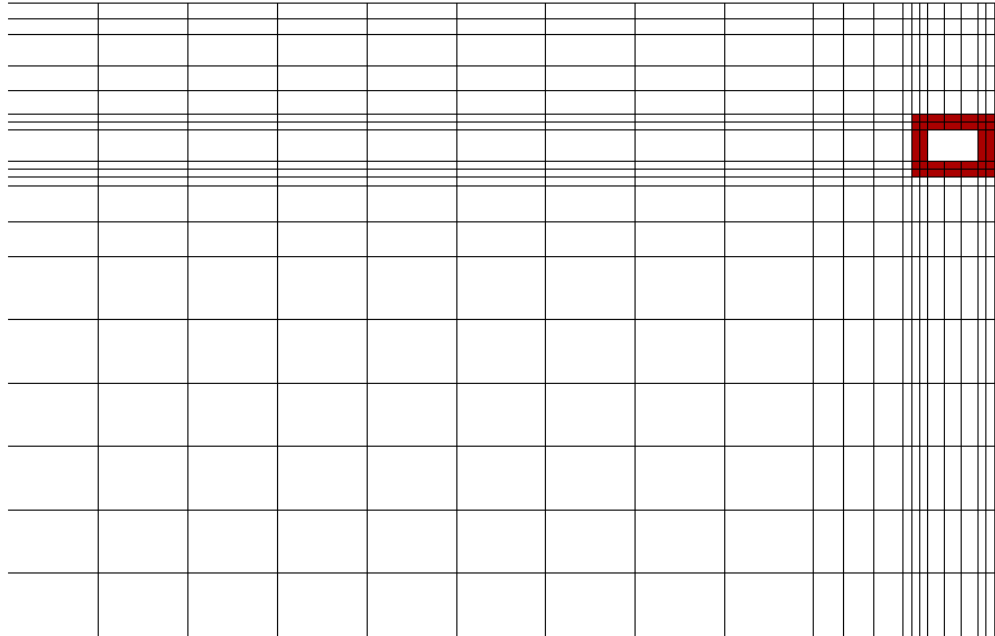


Bilaga 6:

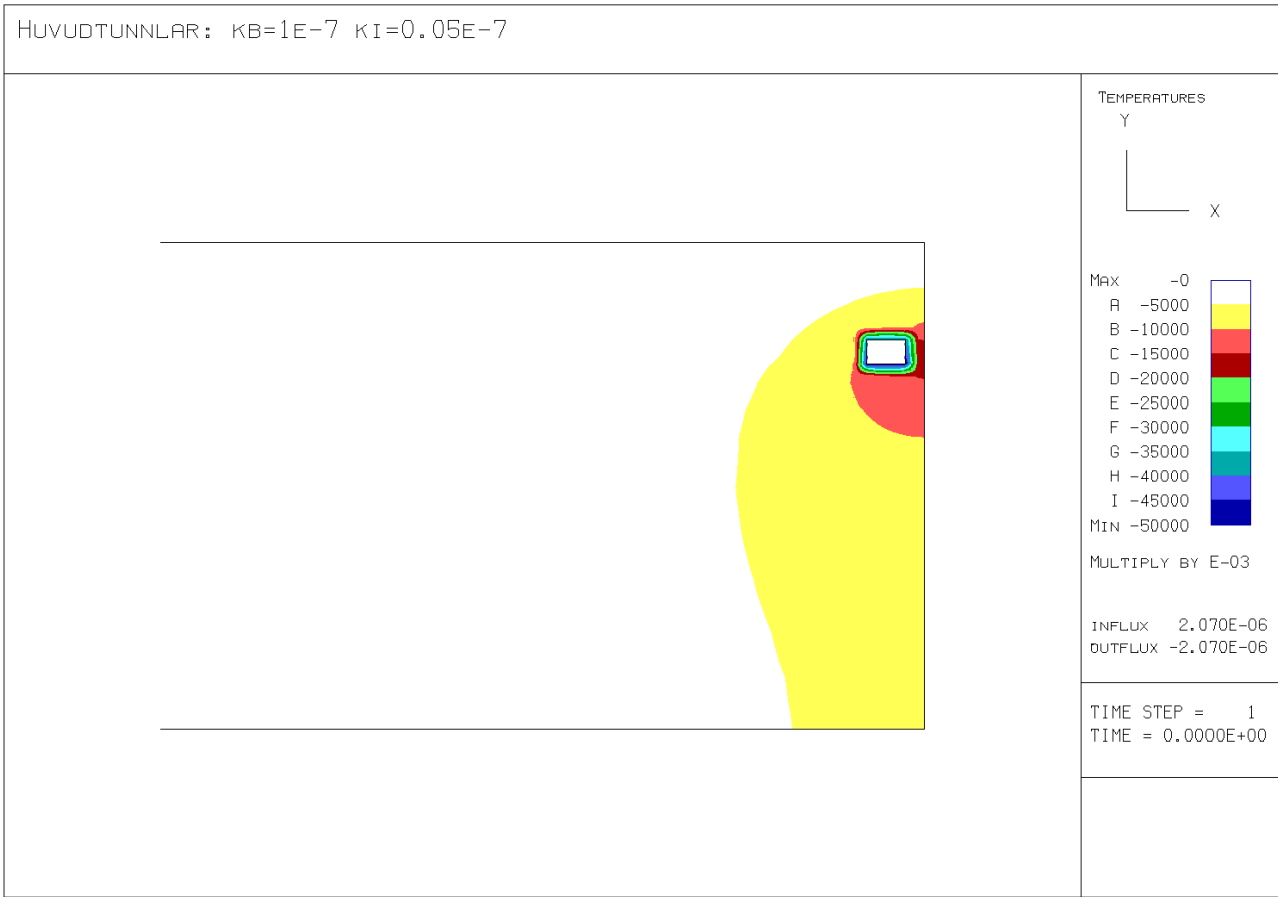
FEM-beräkning av injekterade huvudtunnlar

Hittills har vi räknat på tunneln i fig. 3.3 i [2] och avslutar med en mer realistiskt exempel med två huvudtunnlar, vardera med måtten 15x10 m. Som tidigare utnyttjar vi symmetrin för att minska modellens storlek.

Samma tunneldjup och samma konduktiviteter som tidigare används.

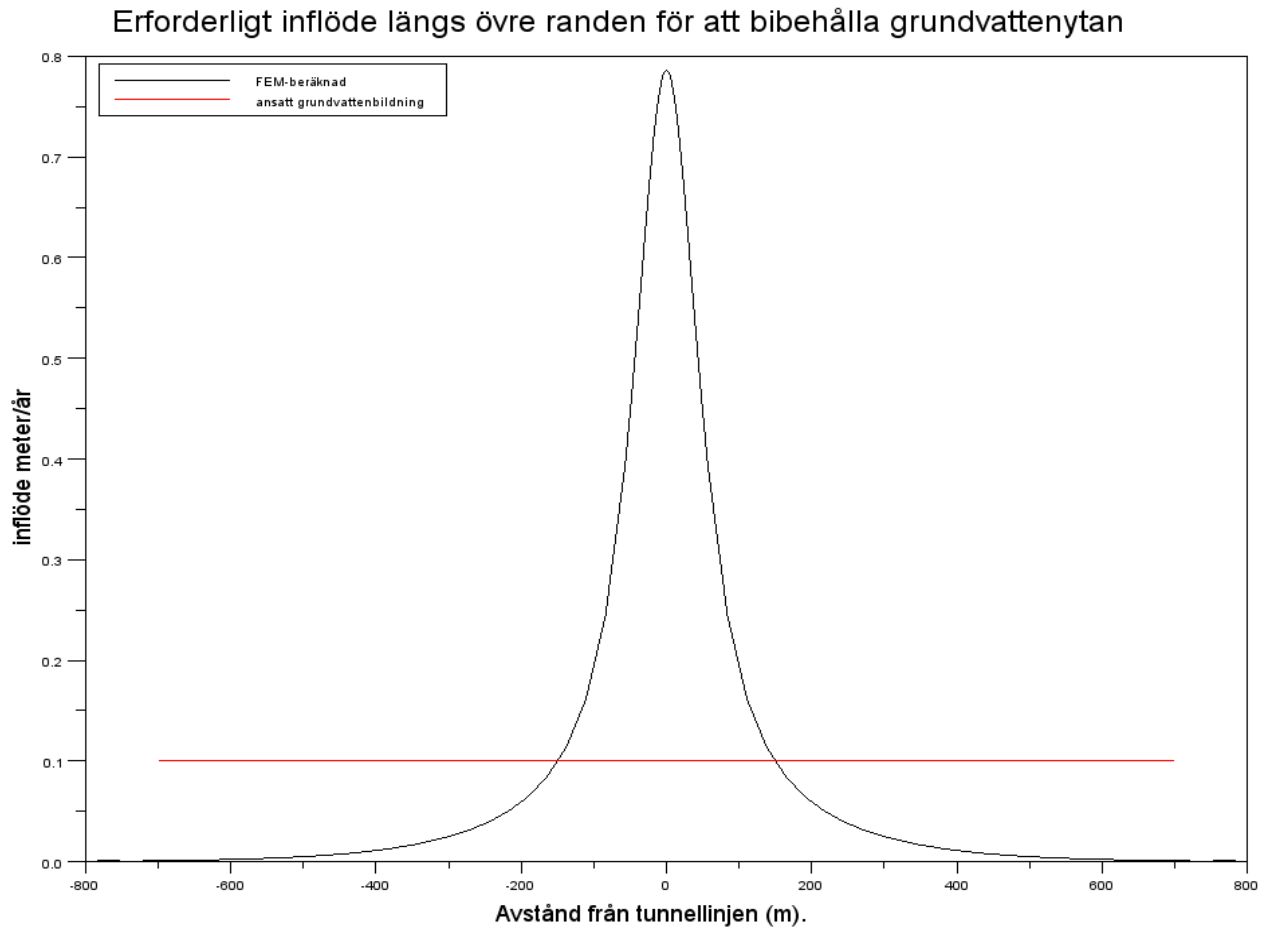


FEM-beräknad trycknivå, injekterade huvudtunnlar
Resultatet visas med samma val av nivåer som tidigare.



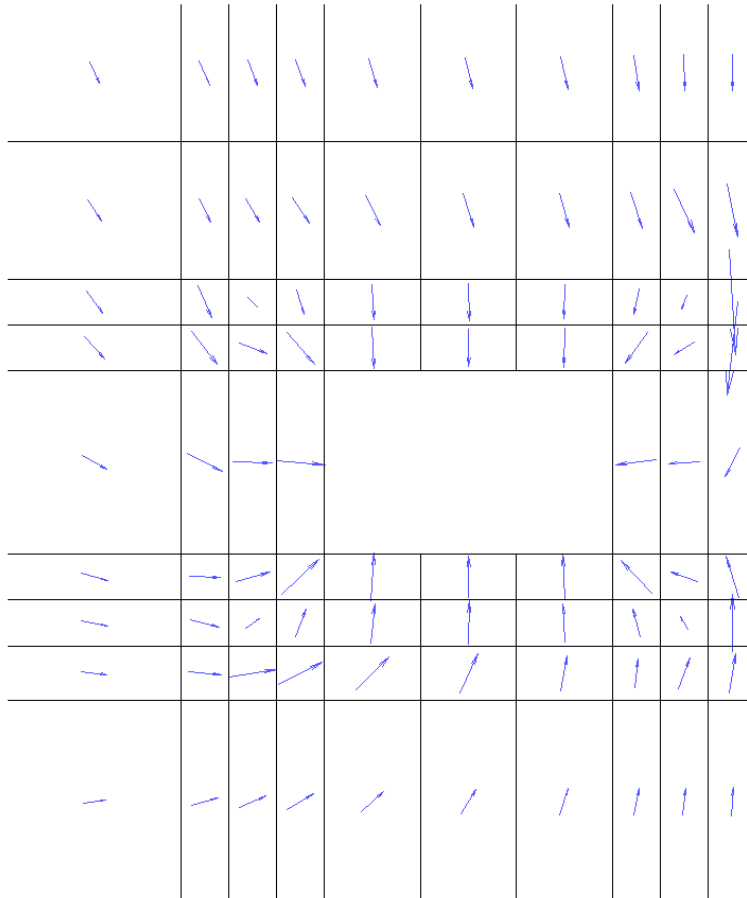
Fördelningen av inflödet utmed modellens överyta

Nedan visas det erforderliga inflödet vid grundvattenytan för att bibehålla grundvattenytans nivå. Värdena avser 1 meter tunnel och per år.



Inflödet från elementen som omger tunnel

Inflödet beräknat enligt tabellen nedan utgör $1,774/2,07 = 86\%$ av det som beräknas ur nodflödena vilket visar att elementindelingen borde göras tätare om man vill studera inflödets fördelning kring tunneln.



	Element-nummer	flödes-komponent	mittelement-värde (m/s)	längd (m)	flöde (m ³ /s och meter tunnel)	
golv	776	q _z	4.0200E-08	5	2.010e-07	11,3%
	777	q _z	3.5090E-08	5	1.755e-07	9,9%
	778	q _z	3.8053E-08	5	1.903e-07	10,7%
tak	918	-q _z	3.4352E-08	5	1.718e-07	9,7%
	919	-q _z	3.0694E-08	5	1.535e-07	8,7%
	920	-q _z	3.2764E-08	5	1.638e-07	9,2%
vänster vägg	846	q _x	3.9400E-08	10	3.940e-07	22,2%
höger vägg	850	-q _x	3.2454E-08	10	3.245e-07	18,3%
summa					1.774e-06	

Bilaga 8

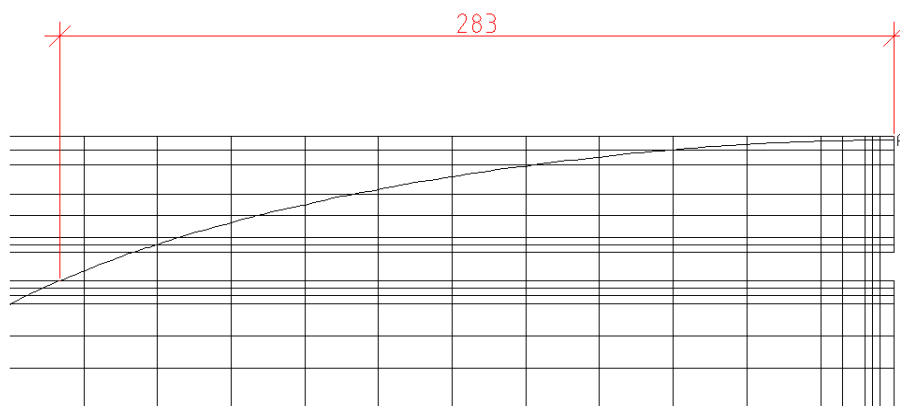
Trafikverkets metod för att bestämma påverkansområdet i berg

Som beskrivits tidigare bestämmer Trafikverket påverkansområdet i berg som ”*område med en meter grundvattenavsänkning eller mer på tunnelns nivå*”. Det finns också ett tillägg i villkoret:

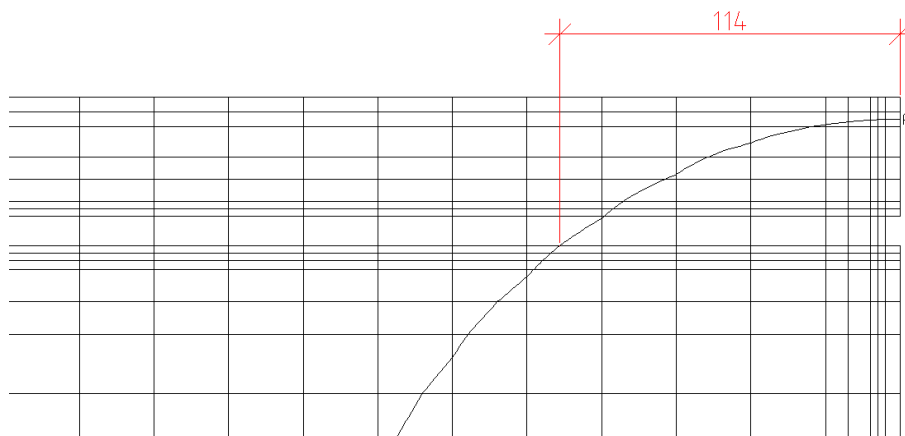
”*Förekommer flera tunnlar på olika nivåer avses nivån för huvudtunnlarna*”. Fastigheter och natur som kan skadas av dräneringen förutsätts veta vilken av tunnlar (om någon) som är huvudtunnel.

Nedan visas området kring tunneln i fig. 3.3 i [2] utan respektive med injektering. Referensnivå väljs till grundvattenytan och nivålinjen för trycknivån -1 m är inlagd. Skärningspunkten mellan nivålinjen och den horisontella linjen på tunnelns golvnivå avgör gränsen för påverkansområdet. Från den punkten dras en vertikal linje uppåt och där den når markytan går gränsen för påverkansområdet.

På vägen vertikalt uppåt från skärningspunkten minskar sänkningen av trycknivån för att vid grundvattenytan vara noll. Trots det anser Trafikverket att det är trycknivån vid tunnelgolvets nivå, i detta fall 50 m ner i berget, som kan skada fastigheter och natur. DLV har begärt att få veta hur och har överklagat metoden. Trafikverket har inte gett något svar på frågan.



Tunnel utan injektering ger 283 m påverkansområde på vardera sidan om tunnellinjen



Tunnel med injektering ger 114 m påverkansområde på vardera sidan om tunnellinjen

Att påverkansområdet minskar när tunneln injekteras är rimligt men inget bevis för att beräkningsmetoden är relevant.

Påverkansområde för oinjekterad tunnel vid ändring av bergets konduktivitet

Om man vill kontrollera hur stort påverkansområdet för den oinjekterade tunneln blir om berget har lägre eller högre konduktivitet än det ansatta 10^{-7} m/s och gör en beräkning finner man att nivåkurvorna för trycknivån inte ändras. Därmed ändras inte heller påverkansområdet enligt TRV:s beräkningsmetod.

Men det är onödigt att göra en separat beräkning för att finna detta. Nivåkurvorna för trycknivån är ett resultat av lösningen av Laplaces ekvation som ju inte innehåller värdet på konduktiviteten, se bilaga 1. Inflödet av vatten i modellen (och i tunneln) är däremot direkt proportionellt mot konduktiviteten.

Påverkansområdet blir alltså - enligt TRV - detsamma oberoende av om bergmaterialet är tätt eller konduktivt. Detta är en konsekvens av att kriteriet för påverkansområdet saknar relevans för det uttalade syftet.

Påverkansområde för injekterad tunnel vid ändring av konduktiviteterna

För beräkningsmodeller med områden med olika hydrauliska konduktiviteter ändras inte nivåkurvornas lägen om samtliga konduktiviteter multipliceras med samma faktor. Detta kan visas genom att genomföra sådana ändringar i de numeriska modellerna. Det betyder att så länge relationen mellan injekteringszonens och bergmassans konduktivitet bibehålls så ändras inte läget för trycknivåns nivåkurvor och därmed inte heller påverkansområdet enligt TRV:s beräkningsmetod.

Om exemplet i bilaga 6 räknas om med exempelvis 10 gånger högre konduktivitet för både k_b och k_i bibehålls relationen mellan dem och påverkansområdet blir därför densamma. Inflödet blir dock 10 gånger högre.

En lägre konduktivitet i injekteringszonen gör att trycknivåns nivåkurvor koncentreras till tunneln. Men en ökning av bergets konduktivitet (vid bibehållande av injekteringszonens) leder till samma resultat. I båda fallen samlas nivåkurvorna kring tunneln varvid påverkansområdet med TRV:s metod minskar.

I [3] avsnitt 3.2 noterar TRV att det beräknade påverkansområdet kan minska när tunneln passerar en tvärgående konduktiv sprickzon. Den högre konduktiviteten i sprickzonen fördelas till bergets vilket kan ge den ovannämnda effekten att nivåkurvorna samlas kring tunneln. Beskrivningen av sprickzonen är dock svår att förstå, i 3.4.3 anges att sprickzonen går upp till jordlagret, i 3.3 når den upp till men inte igenom ytberglagret.

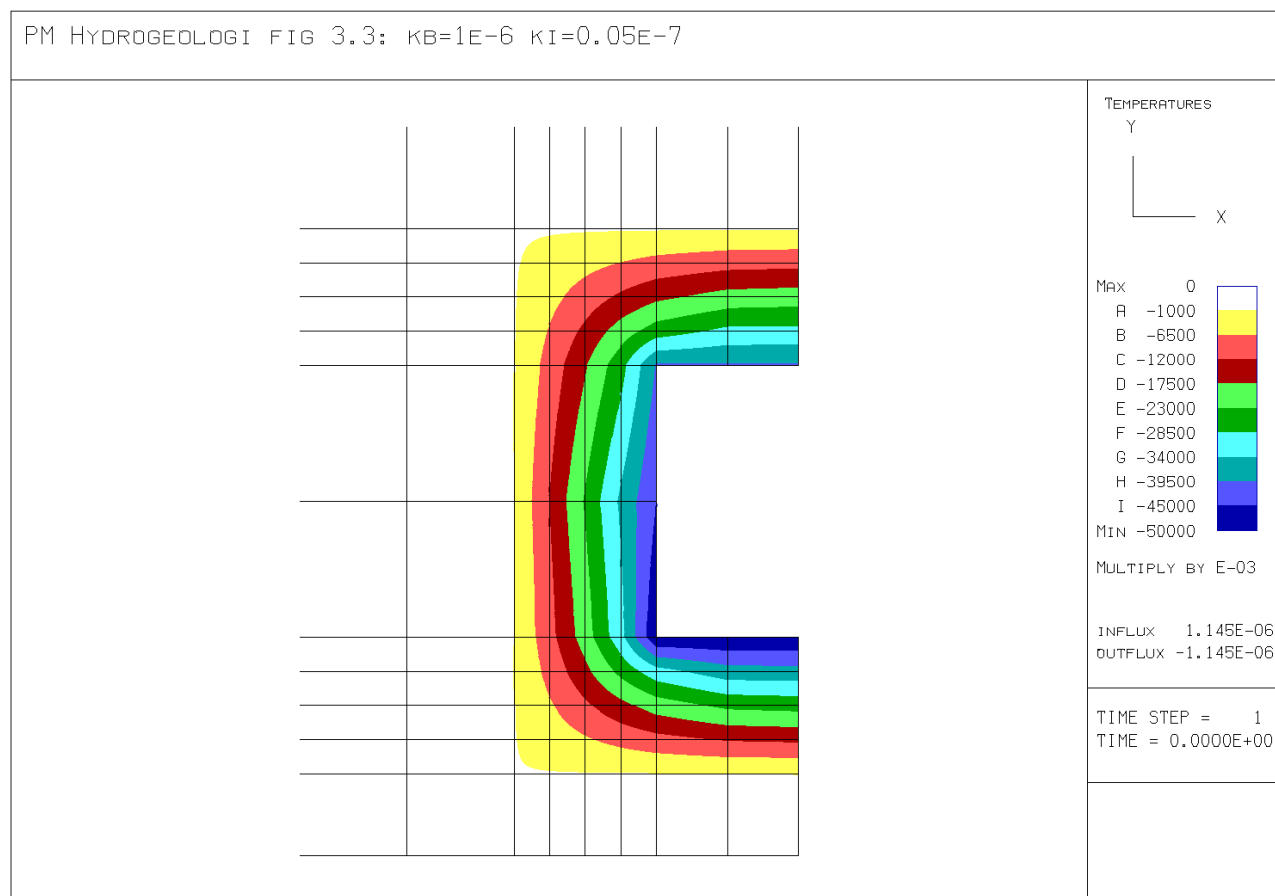
Minimering av påverkansområde för en injekterad tunnel

Trafikverkets metod för att beräkna påverkansområdet i berg har trots överklaganden gillats i alla berörda rättsinstanser i Sverige och måste betraktas som en godkänd metod. Vi skall nu visa hur den kan användas för att göra påverkansområdet minimalt, närmare bestämt tunnelbredden plus 10 meter. Vi tillämpar det på tunneln i fig. 3.3 i [2].

Som framgår av bilaga 9 så räknar man med tre zoner som i olika hög grad minskar vattnets inträngning i tunneln nämligen berget, injekteringszonen och skinfaktorn. I några av formlerna för

inströmning har man på säkra sidan valt att helt bortse från bergets bidrag. Vi skall inte gå så långt men för att inte överskatta bergets bidrag ansätter vi en hög konduktivitet, $k_b = 10^{-6}$ m/s. Vi har gjort beräkningen med ett något tätare FEM-nät än tidigare varvid det injekterade området kring tunneln omfattar de närmaste fyra elementen.

Vi får då följande diagram över trycknivån kring tunneln där nivåkurvorna valts i intervallet -1 till -45 m:



Nivålinjen för trycknivån -1 m utgör gränsen mellan det vita och gula området i diagrammet ovan. Den ligger som synes precis där injekteringszonen börjar, det krävs bara 1 m sänkning av trycknivån från grundvattenytan ned till injekteringszonen i det konduktiva berget.

Vi drar nu en horisontell linje vid tunnelgolvets nivå tills den träffar nivålinjen $h=-1$ m. Gränsen för påverkansområdet hamnar då 5+5 m från tunnellen och påverkansområdet blir totalt 20 m brett.

Om metoden tillämpas för huvudtunnlarna blir påverkansområdet $5 + 3 \cdot 15 + 5 = 55$ m brett. Allt enligt TRV:s godkända metod för att avgränsa påverkansområdet.

Bilaga 9

Formler för beräkning av inläckage i en tunnel med cirkulärt tvärsnitt

Inledning

Det finns en lång rad formler för beräkning av inläckaget till en tunnel under grundvattenytan. Formlerna anger det totala inflödet till tunneln mätt t.ex. i m^3 per sekund och meter tunnel eller i liter per minut och 100 meter tunnel. Det är viktig information ur tunnelbyggarens perspektiv. Var runt tunnelns omkrets det rinner in är av mindre betydelse.

För dem som har fastigheter eller mark ovanför tunneln är det av desto större intresse hur inflödet vid grundvattenytan varierar med avståndet till tunneln. I TRV:s ansökan ägnas den frågan ingen uppmärksamhet. Ändå har det länge varit känt hur inflödet varierar, I [8], avsnitt 3.2.2, refereras till en formel från 1971 som enkelt kan deriveras för att ge inflödet som funktion av avståndet från tunnellen. I [6] finns formeln som ekv. (8.6) och deriverad som ekv. (8.5).

Den vattenmolekyl som skall transporteras från grundvattenytan till tunneln måste passera en eller flera zoner som är ”seriekopplade”. I formlerna representeras dessa zoner som termer i formlernas nämnare.

Polubarinova-Kochina

Polubarinova-Kochina angav i [17] en formel för beräkning av inläckaget till en tunnel med enbart berget som isolerande skikt. Förutsättningarna för formelns giltighet anges i bilaga 2. Speciellt måste man beakta kravet att bibehålla trycknivån vid beräkningsmodellens övre rand.

Om en fri vattenyta t.ex. i form av en sjö eller dylikt finns ovanför tunneln behöver man bara säkerställa vattenytans nivå genom att fylla på vatten i samma takt som vattnet rinner in i modellområdet för att sluta i tunneln. Om trycknivån i modellens överkant i stället representerar en grundvattenyta i det porösa materialet måste man beakta variationen av inflödet utmed övre randen eftersom en utjämning inte automatiskt sker som vid en fri vattenyta.

Shizhong Lei

Shizhong Lei [18] presenterade 1999 en förfinad version av Polubarinova-Kochinas formler. Båda dessa uppsättningar av formler kan kallas analytiska.

Formler presenterade i Eriksson-Stille [7]

I Eriksson-Stille [7] presenteras inte mindre än sex formler (6.1)-(6.6) för beräkning av inläckage i tunnlar. Tre av formelnerna avser oinjekterad tunnel och tre injekterad tunnel. I dessa formler ingår ”skinfaktorn” ξ som enligt [7] anses bero på det ökade flödesmotstånd som uppträder i

den endast delvis vattenmättade zonen i tunnelns närhet och på bergmekaniska förhållanden som spänningssituationen. Skinfaktorn (som kanske borde kallas skintermen) väljs som regel mellan 2 och 5 men någon rationell metod att välja värdet har vi inte sett.

Tre av formlerna tar förutom skinfaktorn upp inverkan av en injekterad zon kring tunneln med lägre hydraulisk konduktivitet än i omgivande berg. Utvidgningarna är sannolikt av ad hoc-karaktär och bör kanske inte benämnas analytiska.

Nedan anges de olika formlerna med en notation som är anpassad till beräkningsprogram som Matlab, Octave eller Scilab med följande beteckningar där log avser naturliga logaritmen:

L = tunnelängden (m)

K_b = bergets konduktivitet (m/s)

K_i = injekteringszonens konduktivitet (m/s)

H = tunneldjup (avstånd från grundvattenytan till tunnelns centrum) (m)

r = tunnelradie (m)

t = injekteringszonens tjocklek (m)

Q är inläckaget i tunneln som är samma som inläckaget i modellens överyta (m^3/s)

ξ = skinfaktorn (-)

$\pi = 3.14159$

Polubarinova-Kochinas formel (oinjekterad tunnel, ingen skinfaktor)

$$Q = 2\pi K_b H L / \log(2H/r)$$

Nämnaren i uttrycket representerar bergzonen.

Shizhong Leis formel har samma förutsättningar som Polubarinova-Kochinas

$$Q = 2\pi K_b H / \log(H/r + \sqrt{(H/r)^2 - 1})$$

Eriksson-Stilles formel (6.1) avser en ytligt förlagd tunnel utan injekteringszon

$$Q = 2\pi K_b (H-r) L / (\log(2H/r) + \xi)$$

Till bergzonen har här adderats skinfaktorn.

Vid små värden på $(H-r)$ anger denna formel ett mycket lågt inflöde.

Eriksson-Stilles formel (6.2) avser en djupt förlagd tunnel ($r \ll H$) utan injektering

$$Q = 2\pi K_b H L / (\log(2H/r) + \xi)$$

Eriksson-Stilles formel (6.3) avser en ytligt förlagd tunnel med en t meter tjock

injekteringszon plus skinfaktor:

$$Q = 2\pi K_i (H-r) L / (\log(1+t/r) + K_i \xi / K_b)$$

Om man förlänger uttrycket med K_b/K_i får man det ekvivalenta uttrycket

$$Q = 2\pi K_b (H-r) L / (K_b/K_i \log(1+t/r) + \xi)$$

varvid man direkt ser att bergzonen har strukits och den injekterade zonen plus

skinfaktorn utgör barriären mot inläckage. Vid små värden på $(H-r)$ ger denna formel mycket lågt inflöde.

Eriksson-Stilles formel (6.4) avser en djupt förlagd tunnel med t meter tjock injekteringszon och skinfaktor:

$$Q = 2\pi K_i H^* L / (\log(1+t/r) + (K_i/K_b) * (\log(2H/(r+t)) + \xi))$$

Om man förlänger uttrycket med K_b/K_i får man det ekvivalenta uttrycket

$$Q = 2\pi K_b H^* L / (\log(2H/r) + K_b/K_i * \log(1+t/r) + \xi)$$

varvid man direkt ser att bergzonen, den injekterade zonen och skinfaktorn ingår med varsin term i nämnaren. Om ingen injektering finns, d.v.s. $K_b = K_i$, fås fortfarande enligt formeln ett bidrag från injekteringszonen.

Gustafsons [8] formel (8.27) är en variant av (6.4) som eliminerar problemet i (6.4) att en utebliven injekteringszon ($K_i = K_b$) bidrar till nämnaren i formeln.

$$Q = 2\pi K_b H^* L / (\log(2H/r) + (K_b/K_i - 1) * \log(1+t/r) + \xi)$$

Notera att H i [8] avser tunnelgolvets djup under grundvattenytan, inte tunnelcentrums.

I vårt exempel ändras täljaren med faktorn 50/45 jämfört med Eriksson-Stilles formel 6.4 och nämnaren minskar samtidigt något då K_b/K_i ersätts med $(K_b/K_i - 1)$.

Eriksson-Stilles formel (6.5) avser en oinjekterad tunnel och är en förenklad formel enligt Gustafson m.fl. [8] där den återfinns som formel (8.28):

$$Q = K_b H^* L$$

Eriksson-Stilles formel (6.6) avser en injekterad tunnel och är en förenklad formel enligt Gustafson m.fl. [8] där den återfinns som formel (8.29).

$$Q = 2\pi K_i H^* L$$

Tunnel utan injekteringszon

För att få en bild av hur stor spridning av beräknat inläckage de olika formlerna ger visas detta i ett diagram.

Följande värden har använts vid beräkningen som omfattar $H = 10 - 60$ m :

$$L = 1 \text{ m}$$

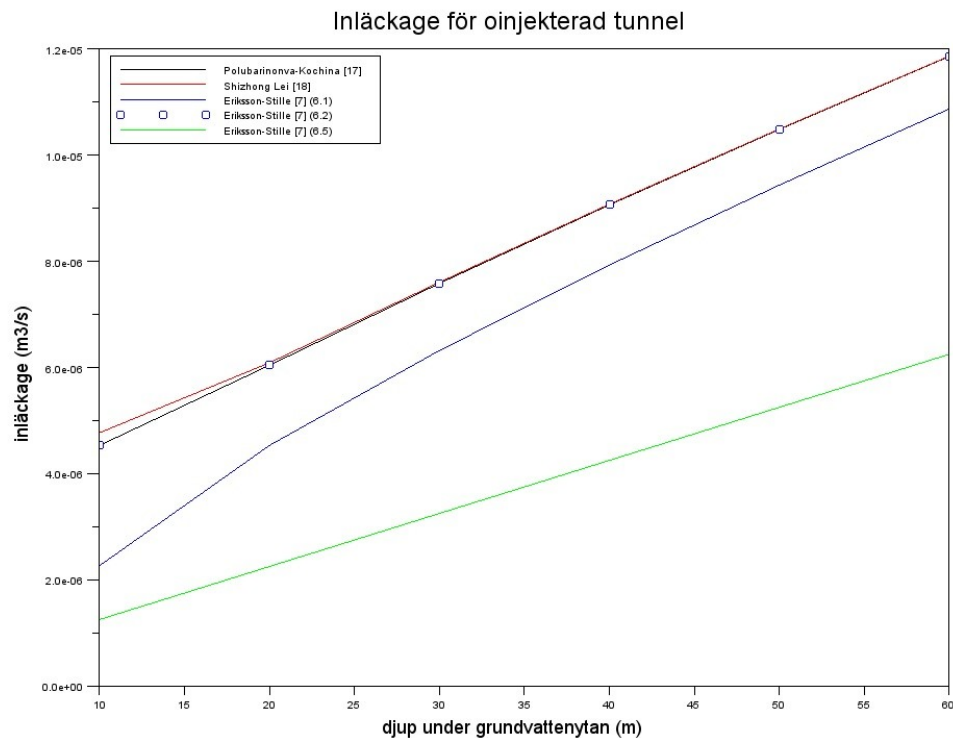
$$K = 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$r = 5 \text{ m}$$

$$\xi = 0$$

Lei och Polubarinova-Kochinas formler ger nästan samma resultat om H är större än 20 meter. Ekvation (6.2) med skinfaktor $\xi = 0$ är samma som Polubarinova-Kochinas.

Gustafsons m.fl. formel (6.5) ger mycket låga värden jämfört med de andra formlerna.



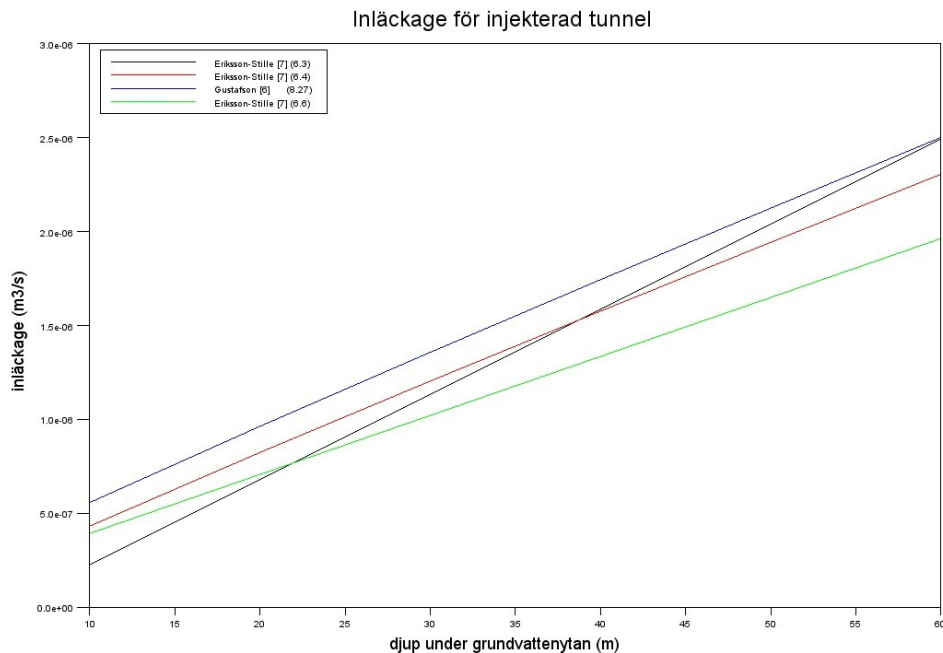
Tunnel med injekteringszon

Samma värden som ovan har använts med tillägg för $K_i = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s

Den formel som Trafikverket använder i [3] är (6.4) men med skinfaktor 1,5 till 2,5.

Det modellberäknade inflödet uppges ge god överensstämmelse med formeln.

I modellberäkningen är dock skinfaktorn inte medtagen och inte heller redovisas vilken tunnelradie som används.



I Gustafsons formler 6.5, 6.6 och 8.27 har H satts till avståndet mellan grundvattenytan och tunnelgolvet såsom i [6], för övriga mäts H till tunnelcentrum.

Inkludering av skinfaktorn vid numeriska modeller

Vid exempelvis FEM-program finns ingen möjlighet att i indata ange skinfaktorn ξ . Men skinfaktorn kan beaktas genom att räkna med ett lägre värde på konduktiviteten K_i .

Formeln (6.4) ovan,

$$Q = 2\pi K_i H L / (\log(1+t/r) + (K_i/K_b) * (\log(2H/(r+t)) + \xi))$$

kan förlängas med K_b/K_i och blir då

$$Q = 2\pi K_b H L / (\log(2H/(r+t)) + K_b/K_i * \log(1+t/r) + \xi)$$

varvid täljaren blir oberoende av K_i .

Vi kan nu införa en modifierad konduktivitet K_{i64} i den injekterade zonen så att nämnaren inte ändras om ξ samtidigt sätts till 0:

$$\log(2H/(r+t)) + K_b/K_{i64} * \log(1+t/r) + 0 = \log(2H/(r+t)) + K_b/K_i * \log(1+t/r) + \xi$$

varur man får

$$K_{i64} = K_b * \log(1+t/r) / (K_b/K_i * \log(1+t/r) + \xi)$$

Med ovan angivna värden för tunneln och $\xi = 2$ fås då $K_{i64} = 4,37 * 10^{-9}$ m/s i stället för ursprungliga $5 * 10^{-9}$

Formeln (6.3) ger på samma sätt om den modifierade K_i kallas K_{i63} villkoret

$$K_b/K_{i63} * \log(1+t/r) + 0 = K_b/K_i * \log(1+t/r) + \xi$$

varur man får $K_{i63} = K_{i64}$ enligt ovan

I formeln (8.27) från [6] får man villkoret

$$\log(2H/r) + (K_b/K_{i827} - 1) * \log(1+t/r) + 0 = \log(2H/r) + (K_b/K_i - 1) * \log(1+t/r) + \xi$$

vilket ger $K_{i827} = K_{i64}$ som ovan

Inflödets variation utmed grundvattenytan

Om man använder Polubarinova-Kochinas eller Leis formler för inläckaget finns tillhörande explicita uttryck för trycknivån $h = h(x,z)$ som kan deriveras med avseende på z varur det vertikala nedåtriktade inflödet vid grundvattenytan $q_z = q_z(x,0)$ kan beräknas som funktion av avståndet till tunnellen. q_z vid grundvattenytan varierar kraftigt. Dessa formler gäller för Polubarinova-Kochinas formler men Leis ger mycket snarlika resultat.

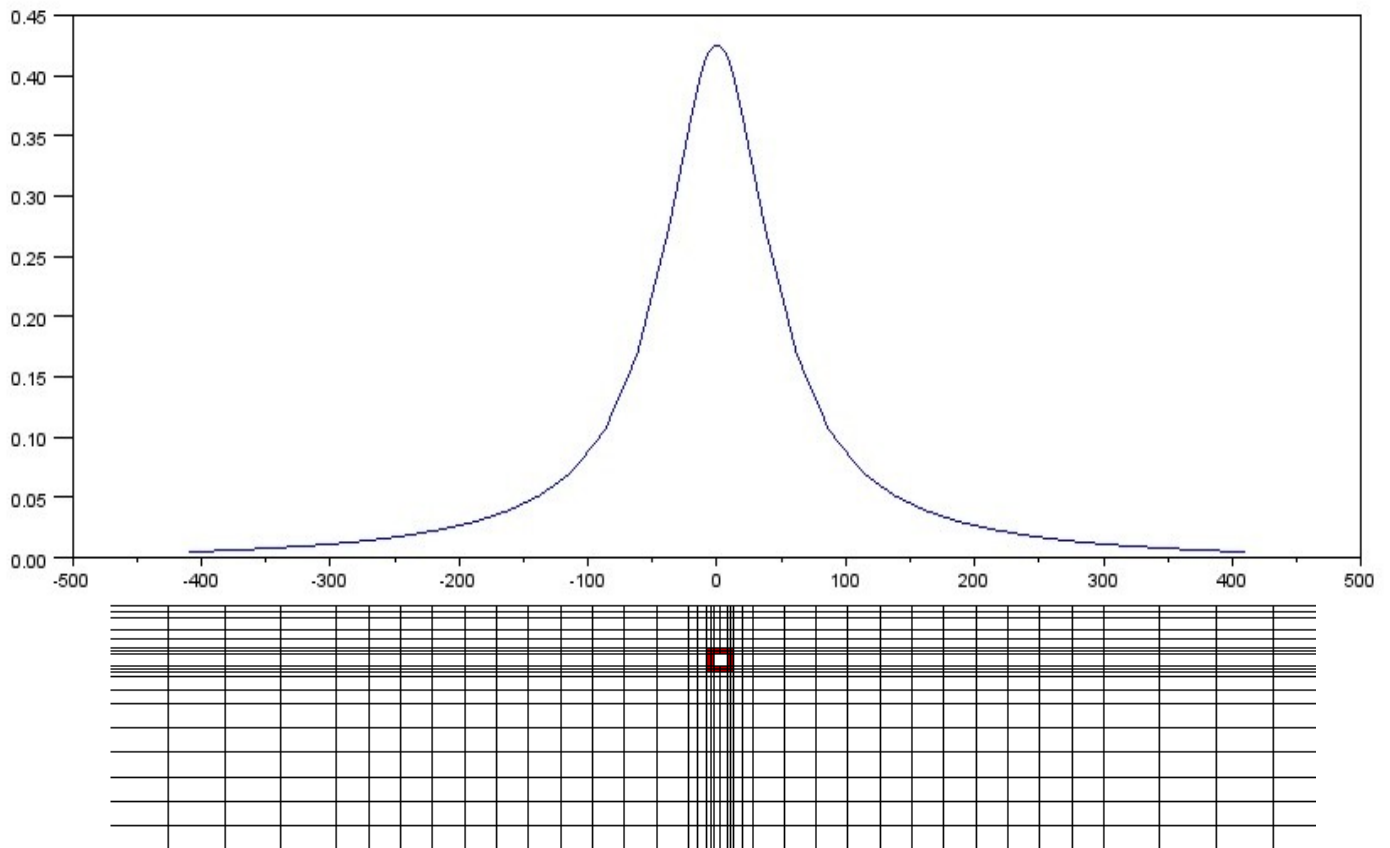
Gustafson [6] tillämpar Polubrainova-Kochinas formel för q_z som funktion av x även när totalflödet Q beräknats för en tunnel med injekteringszon enligt formeln (8.27) i [6] och anger dels toppvärdet vid $x = 0$ som

$$q_z(0,0) = Q/(\pi \cdot H)$$

dels hur q_z varierar med avståndet x från tunnellen

$$q_z(x,0) = q_z(0,0)/(1 + x^2/H^2)$$

Nedan visas elementnätet för tunneln i fig. 3.3 i [3] med diagram över det FEM-beräknade inflödet vid modellens övre rand omräknat till m/år. Skalorna i horisontell led är lika.

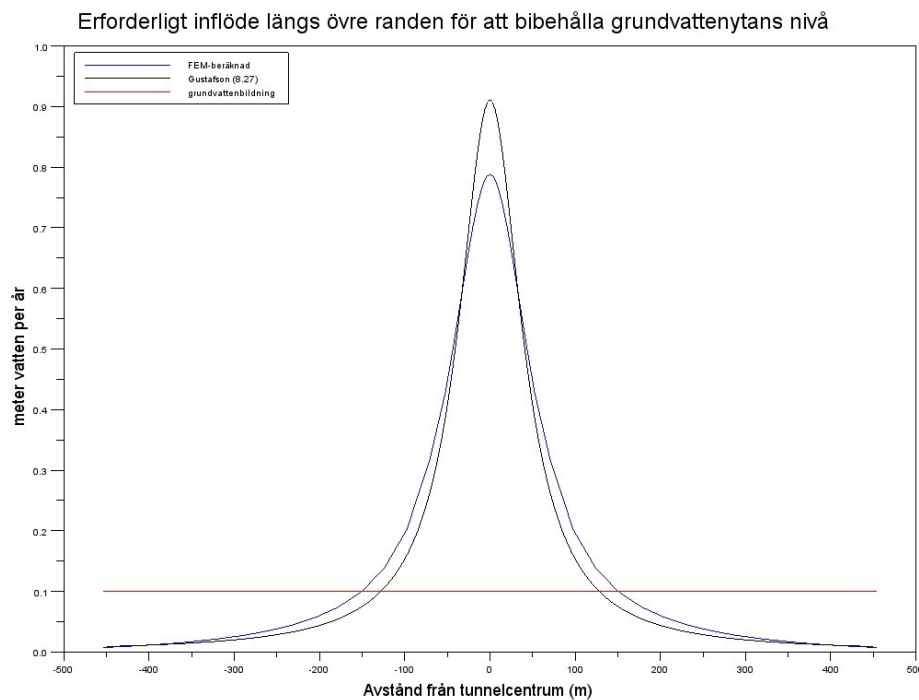


Kan formlerna användas för ickecirkulära tunneltvärsnitt?

I [3] anges att överensstämmelsen är god mellan resultatet från modellberäkningen och formeln (6.4) om man sätter skinfaktorn i formeln till 1,5-2,5. Eftersom ingen skinfaktor satts i indata till Modflow så borde de inte tagits med i formeln heller.

Trafikverket måste också använda någon metod att beräkna tunnelradien när de använder den analytiska formeln men anger inte vilken. Inte heller ges data för hur god överensstämmelsen är mellan formeln och Modflow-beräkningen eller hur hänsyn tas till de torra modellcellerna.

Gustafson [6] tillämpar formeln (8.27) med radien beräknad ur tunnelarean. Inget motiv för det valet ges men om man betänker att hela tunnelomkretsen utsätts för en gradient som vill trycka in vatten så är omkretsen ett rimligare val vilket styrks av bilderna med flödesvektorer i bilaga 5 och 6. De två huvudtunnlarna har en sammanlagd area på 300 m^2 så radien beräknad ur tunnelarean $r_a = 9.8 \text{ m}$. De har den sammanlagda omkretsen 100 m så $r_p = 15,9 \text{ m}$. Det tidigare visade diagrammet på inflödet som funktion av avståndet visas på nytt nedan, dels beräknad med FEM, dels med (8.27) och $r = 15,9 \text{ m}$.



Här har dock i (8.27) satts till avståndet från grundvattenytan till tunnelcentrum och inte till tunnelgolvet som görs i [6].

Om man gör tankeexperimentet att de två huvudtunnlarna inte hade getts en mellanvägg skulle omkretsen vara 80 m och $r_p = 12.7 \text{ m}$ medan r_a inte hade påverkats. Att det är motiverat att ta med alla fyra tunnelväggarna vid beräkning av omkretsen blir klart när man beaktar diagrammet med flödesvektorer i bilaga 6 och tillhörande tabell.

Tabellen nedan visar resultaten från FEM-beräkningen och från formlerna i [6] med två olika tunnelradier. Inflödet räknas i liter per minut och 100 m tunnel.

- *q-max* avser toppvärdet på inströmningen (mitt över tunnellinjen)
- *erforderligt inflöde* är det som krävs för att grundvattenytan skall bibehållas konstant
- *från grundvattenbildning* avser den del som den ansatta grundvattenbildningen bidrar med
- *underskott* är den vattenmängd som måste infiltreras eller som tas från grundvattenmagasinet
- *underskottszon* avser bredden på den zon där grundvattenbildningen inte räcker

	q-max m/år	erforderligt inflöde	från grundvattenbildning	underskott	underskottszon (m)
FEM	0.79	24.86	9.70	15.16	301
r=15,9	0.91	24.51	10.15	14.36	256
r=9.8	0.63	16.85	8.34	8.52	207

Om man i formeln väljer radien så att omkretsen bevaras blir resultatet i detta fall mycket snarligt FEM-lösningens. Om radien väljs så att tunnelarean bevaras underskattar man inflödet med 32% medan andelen från grundvattenbildningen inte påverkas lika mycket så underskottet minskar kraftigt.

Det bör vara värt att undersöka om den ”analytiska” lösningen kan användas vid en preliminär kalkyl av vattenbalansen även för tunnlar som inte är approximativt cirkulära.

Beräkningen kan lätt programmeras och kräver ett minimum av indata, för detta exempel

$H = 45$, $r = 15.9$, $t = 5$, $K_b = 1e-7$, $K_i = 0.05e-7$, $\xi = 0$, grundvattenbildning = 0.1

Samtidigt ger den information som de omfattande Modflowberäkningarna i [3] helt har missat.

Om data för den tunnel som visas i fig. 3.3 i [2] är något så när representativa, måste slutsatsen bli att långa sträckor utmed tunnellinjen måste infiltreras, något som TRV inte räknat med eftersom de kommit fram till en positiv vattenbalans i kapitel 2 i [3].

Utan infiltrering av vatten kommer grundvattenmagasinet successivt att tömmas och grundvattenytan sjunker. Den sjunkande grundvattenytan minskar visserligen tömningstakten och leder samtidigt till att grundvatten från angränsande områden strömmar till. Det är svårt att beräkna om ett jämviktsläge nås innan grundvattenytan når tunnelgolvets nivå såsom antas i [15].

Det finns många parametrar att spela med vid beräkning av inläckage med formlerna i denna bilaga. Till att börja med finns många formler att välja mellan. Samtliga av dessa förutsätter ett cirkulärt tunneltvärsnitt. Om det aktuella tvärsnittet inte är cirkulärt kan man välja radien på flera olika sätt, exempelvis så att tunnelarean eller tunnelns omkrets blir samma som för det cirkulära.

Man kan använda en skinfaktor som kan variera från 0 -5 utan att direkt motivera valet.

Man kan välja tunnelgolvet i (8.27) eller tunnelcentrum som i de andra formlerna.

Med så många möjligheter att anpassa beräkningarna och när det samtidigt kan finnas ett önskat utfall borde en känslighetsanalys redovisas så att osäkerheten i beräkningsresultatet blir belyst.

Bilaga 10

Tidigare arbeten som behandlar frågan om påverkansområdet

En tidig tidskriftsartikel som behandlar frågan om inläckage av vatten till tunnlar i berg samt hur omgivningen påverkas av grundvattenytans sänkning är [15].

Influensavståndet, det område nära tunneln inom vilket skador på grund av grundvattenytans sänkning kan förväntas, sätts där grundvattenytans beräknade sänkning är 1 m. Avståndet beräknas med en formel för fri grundvattenyta i en öppen akvifär med en given grundvattenbildning enligt Huisman 1972 [16]. Grundvattenytans sänkning vid en tunnel i berg illustreras av nedanstående figur som inklusive bildtext är hämtad ur [15].

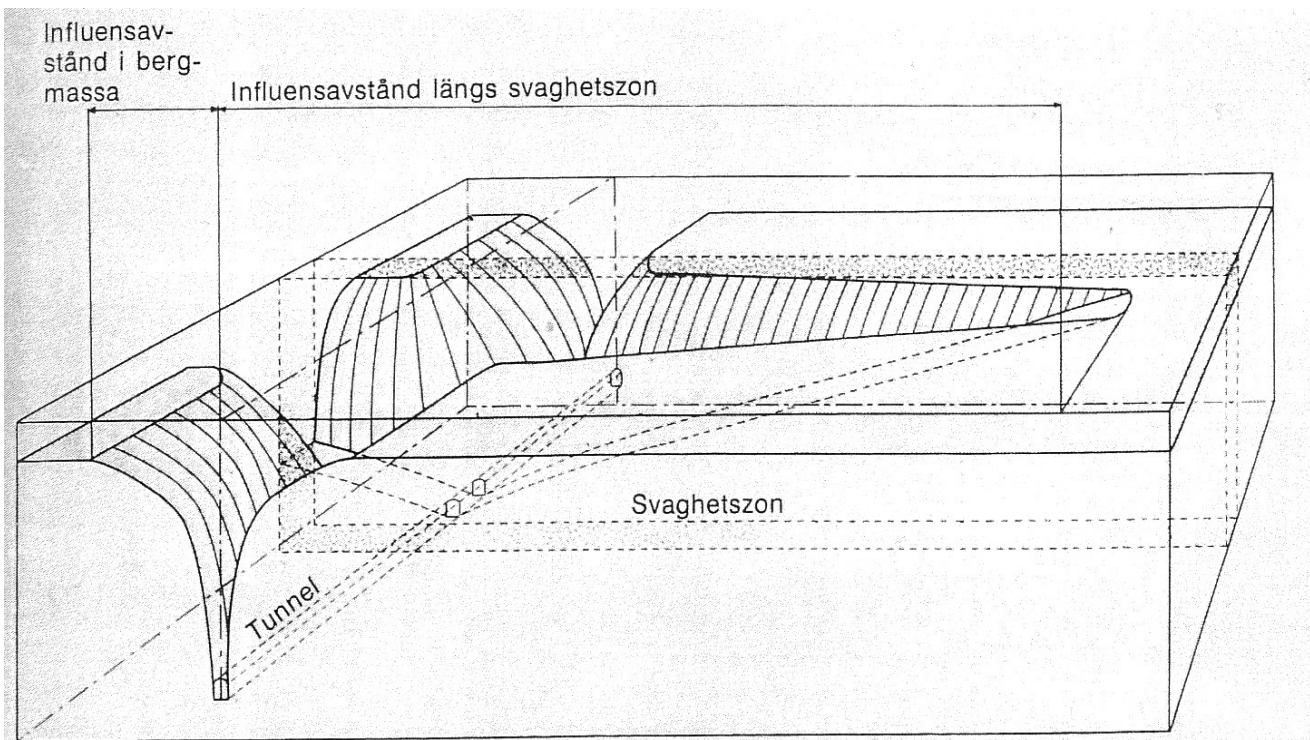


Fig 2. Schematisk bild av grundvattensänkning längs en tunnel. Det påverkade områdets utbredning är olika för bergmassan och för tektoniska vattenförande zoner. Grundvattenytan är den rasterade ytan i figuren.

Notera hur influensavståndet förväntas öka vid en svaghetszon. I TRV:s PM Hydrogeologi, beräkningsbilagan [3] avsnitt 3.2 finner man att påverkansområdet kan bli mindre när tunneln passerar en tvärgående konduktiv sprickzon. En möjlig förklaring till detta ges i bilaga 8 och beror i så fall på TRV:s kriterium för att avgränsa påverkansområdet.

Metoden används bland annat i kandidatarbetet [10] som avhandlar påverkan av tunnarna vid Förbifart Stockholm.

Även i [11] beräknas sänkningen av grundvattenytan ned till tunnelgolvets nivå men där i stället med

Thiems brunnsformel.

Det är en svår uppgift att bestämma en rörlig grundvattenytans läge i en öppen akvifär oavsett om man försöker göra det med matematiska eller med numeriska metoder. I avsnitt 9.8.1 [2] redovisas kortfattat en sådan beräkning med ett avancerat datorprogram baserat på finita elementmetoden. Där går man också vidare med kopplingen till de geotekniska konsekvenserna av grundvattenytans sänkning i form av sättningsberäkningar. I [11] skildras problemet att få beräkningar med en rörlig grundvattenyta att konvergera.

Bilaga 11

Några ord om hydrogeologisk terminologi

En gemensam terminologi är en nödvändig förutsättning för en meningsfull kommunikation. Den som vill tränga in i ämnet hydrogeologi med hjälp av svensk litteratur bör varnas för att facktermer används olika av olika författare, ofta utan definition. Några av problemen berörs nedan och borde ha betydelse för mark- och miljödomstolarna för att kunna tolka Miljöbalkens formuleringar.

Grundvattennivå

Miljöbalken (MB) talar om skador på grund av *”ändring av grundvattennivån”* men definierar inte ordet grundvattennivå. Det mesta talar för att man menar grundvattenytans nivå.

I [6] och [12] definieras grundvattennivå som vi i bilaga 1 definierar grundvattnets trycknivå. I [6] används ordet avsänkning när trycknivån sjunker. I samma bok (sid 117) används ordet avsänkning för sänkning av grundvattenytan.

TRV definierar i PM Hydrogeologi [2], kap 2, grundvattennivå som grundvattenytans läge varefter de definierar grundvattenyta: *”Används här även liktydigt med grundvattnets trycknivå.”* Trycknivå definieras inte.

SMHI mäter regelbundet grundvattennivån på olika platser i Sverige men när man frågar SMHI efter en definition hänvisar de till SGU.

SGU hänvisar till Rikstermbanken där man kan hitta stöd för (minst) två tolkningar av ordet, dels grundvattenytans nivå, dels grundvattnets trycknivå. Mata gärna in ordet grundvattennivå i deras sökfunktion på <http://www.rikstermbanken.se/rtb/simpleSearch.html>

VISS ordlista hänvisar den som söker definition av grundvattennivå till ordet grundvattenyta <http://projektwebbar.lansstyrelsen.se/viss/Sv/ordlista/Pages/ordlistag.aspx>

Mark- och miljööverdomstolen vill inte precisera hur den tolkar ordet grundvattennivå trots att den har makt att döma till 2 års fängelse för *”den som med uppsåt eller av oaktsamhet bedriver verksamhet eller vidtar en åtgärd som ändrar yt- eller grundvattennivån på ett sätt som skadar eller kan skada människors hälsa, djur eller växter i en omfattning som inte har ringa betydelse eller som medför eller kan medföra någon annan betydande olägenhet i miljön.”*

Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet kallas ibland permeabilitet men det är två olika saker enligt Reh binder [9]. Grundvattnets bruttohastighet i ett poröst medium är enligt Darcys lag proportionell mot den hydrauliska konduktiviteten som (i SI-enheter) har dimensionen i m/s.

Trycknivå

Trycknivå förklaras utförligt i bilaga 1. Trycknivån spelar samma roll för grundvattenströmning i ett poröst material som temperaturen för värmeledning i en fast kropp.

I engelskspråkig litteratur används ofta termen *hydraulic head* eller *piezometric head*. *Hydraulic head* utgör summan av *elevation head* och *pressure head* vilka i [5] kallas *lägespotential* respektive *tryckpotential*.

I svensk hydrogeologisk litteratur kan man hitta en rad olika ord för detta centrala begrepp. När vi väljer ordet trycknivå följer vi [5] sid 97, men vi kunde valt bland ett halvdussin andra termer för samma sak:

hydraulisk potential [5]
stighöjd [19]
tryckhöjd [9]
stignivå (Handboken Bygg 3:e upplagan)
potential [9]
grundvattennivå [6] och [12]
piezometric level [8]
totalt hydrauliskt tryck [22]
totalpotential [5a], [20]
grundvattenpotential [5a]
hydraulisk höjd [25]

Ännu mer förvirrande blir det när vissa av dessa ord betyder andra saker i annan litteratur:

I Geoteknisk ordlista (1975) används ordet tryckhöjd för begreppet tryckpotential (pressure head).

I [6], sid 40, används ordet trycknivå i samband med pumptest.

Joakim Onkenhout har granskat och godkänt [2] där grundvattennivå definieras som grundvattenytans nivå medan han är medförfattare i [12] där grundvattennivå definieras som det vi kallar trycknivå.

Grundvattenavsänkning,

Berzell [1] och [2] talar om grundvattenavsänkning när vattnets trycknivå sjunker.

Ibland används uttrycket grundvattenpåverkan t.ex. vid fig. 3.3 i [2].

I [11] används ordet för grundvattenytans sänkning.

Grundvattensänkning, grundvattenpåverkan

Ordet grundvattensänkning användes av TRV för grundvattenytans sänkning i ett undre grundvattenmagasin.

Påverkansområde, influensavstånd, influensradie

Trafikverkets definition av påverkansområde finns i [1] och citeras tidigare i denna skrift.

Influensavstånd används i [15] på liknande sätt som ordet påverkansområde.

Influensradie används i [11] som en något svårbestämd konstant i samband med Thiems brunnsekvation men också som ett mått det område som får sänkning av grundvattenytan.

Bilaga 12

Behandling i domstolarna av DLV:s överklagande

Efter huvudförhandlingarna i MMD i september 2014 angående vattenbortledning mm för Förbifartens tunnlar överklagande Djurgården- Lilla Värtans Miljöskyddsförening TRV:s beräkningsmetod för bestämning av påverkansområdet. Metoden beräknar inte sänkningen av grundvattenytans nivå vilket borde vara det primära i samband med definition av påverkansområdet. I stället beräknar den ändringen av grundvattnets trycknivå som dock varierar med djupet under grundvattenytan. Därför måste även ett djup anges. Utan att förklara varför väljer TRV tunnelns golvnivå. I exemplet i PM Hydrogeologi ligger det 50 m under grundvattenytans nivå. Vilken inverkan sänkningen av trycknivån där har på fastigheter och natur anges inte.

Dom i MMD

Den 17 december 2014, meddelades domen som inte med ett ord berörde DLV:s framförda synpunkter. Rättens tekniska råd, hydrogeologen Ola Lindstrand, uppgav sig vid en telefonkontakt strax efter domen ha läst DLV:s synpunkter men angav att de inte påverkade domen. Det är ett märkligt påstående då påverkansområdet bestämmer vilka som är sakägare i målet. Samtidigt avböjde han att diskutera sakinnehållet i DLV:s överklagande och gav rådet att begära överprövning i Mark- och miljööverdomstolen.

Överklagande i MÖD och HD

DLV tillförde fler argument och visade bland annat att exempeltunneln som visas i fig. 3.3 [2] inte kan klara vattenbalansen samt begärde prövningstillstånd i Mark- och Miljööverdomstolen vilket avslogs. Tekniskt råd i MÖD var Dag Ygland.

DLV begärde överprövning i Högsta domstolen vilket likaså utan motivering avslogs.

Förhandlingar i MÖD i oktober 2015

De frågor som fått prövningstillstånd togs upp i förhandlingar i oktober 2015 och domen meddelades den 4 december. DLV hade inför huvudförhandlingarna hemställt att MÖD skulle precisera hur MB:s uttryck ”ändring av grundvattennivå” skall tolkas men MÖD avslog hemställan med hänvisning till att DLV:s överklagan inte fått prövningstillstånd.

MÖD:s dom innehöll ett avsnitt om påverkansområdet trots att det inte fick prövningstillstånd och inte hade diskuterats under förhandlingarna. Domstolen medger i domskälen att terminologin i ansökan inte var konsekvent men ansåg att Trafikverket hade förklarat de kriterier man använde för att bestämma påverkansområdet. Som juridisk lekman tror man att domstolen skall avgöra om sökanden följer Miljöbalkens krav men här räcker det med att MÖD förstår de kriterier som sökanden valt.

Vidare kommenterar MÖD i domen att TRV:s beräkningar förutsätter en positiv vattenbalans, något som problematiserades i DLV:s ansökan om prövningstillstånd och som även behandlas i denna skrift.

TRV:s agerande

DLV har i sina inlagor ställt frågor kring modelleringen som TRV inte i något sammanhang besvarat.

I september 2015 kom helt överraskande en inlaga från TRV (aktbilaga 112) där man ägnade en dryg A4-sida till att kritisera Föreningarna, d.v.s. de miljöföreningar som företräds av GBH Miljörätt. Orsaken var att de stött DLV:s kritik av beräkningsmetoden för påverkansområdet.

I en inlaga daterad 2015-05-04 skrev Föreningarna:

”Föreningarna vill i detta sammanhang även stödja DLVs, Djurgården-Lilla Värtans miljöskydds-förenings, skrivelse angående hur bedömning av påverkansområdets utbredning har utretts av Trafikverket.

...

Föreningarna har inte kompetens att bedöma de tekniska frågorna men vet att DLVs skrivelse bygger på tekniskt kunnande och en stor arbetsinsats.”

I aktbilaga 112 ställdes Föreningarna till svars för tekniska detaljfrågor som DLV avhandlat i sina överklaganden. I inlagan förvanskar TRV DLV:s utsagor bakom garderingar som ”kan tolkas som” eller ”såvitt TRV förstår”.

I överklagan till MMD hade DLV skrivit att inga känslighetsanalyser presenterades vid förhandlingarna. TRV omformulerade det till att DLV påstått att inga sådana gjorts varefter TRV indignerat hävdade att det var fel. Taktiken att förvränga vad motparten sagt och sen angripa nidsbilden kallas på engelska ”straw man” och nu tillämpades den av höga jurister på Trafikverket, Marie Borgblad och Anders Bengtsson.

Föreningarna fick inlagan som föreläggande med möjlighet att bemöta den skriftligt eller vid huvudförhandlingarna medan DLV enbart fick den för kännedom. DLV begärde ändå tid för bemötanden på samma sätt som Föreningarna erbjudits.

När den preliminära förhandlingsordningen publicerades fick TRV intrycket att DLV skulle få tid för bemötande och skrev en skarpt formulerad inlaga (aktbilaga 157) varur vi citerar:

DLV har av Mark- och miljööverdomstolen inte bedömts som klagande i målet. Det innebär att föreningens yrkande – såsom Trafikverket uppfattat det - att av Trafikverket redovisade gräns för påverkansområden kan ifrågasättas, inte är föremål för prövning i målet. Enligt domstolens preliminära förhandlingsordning kommer föreningen dock under punkten 4 att beredas tillfälle att redovisa sin inställning till yrkandena. Trafikverket ställer sig frågande till i vilket avseende? Trafikverket menar att frågan har sitt berättigande med anledning av att DLV begärt att få hålla en föredragning om ca en timme avseende olika metoder för påverkansområdets bestämmande.

Begäran att få bemöta de frågor som TRV själva valt att framföra beskrivs nu som att DLV begärt att hålla en timplång föredragning om olika metoder att bestämma påverkansområdet.

Lite längre fram fortsätter TRV:

Trafikverket menar att det endast är vad som redovisats under a) ovan som bör vara föremål för prövning i Mark- och miljööverdomstolen. Med anledning därav anser Trafikverket att den redovisning som DLV begärt att få lämna under huvudförhandlingen inte ska beviljas eftersom den inte hör till prövningen i målet i denna instans.

Om domstolen trots det överväger att tillåta att DLV får det utrymme under huvudförhandlingen som föreningen begärt, hemställer Trafikverket att domstolen, innan beslut fattas, förelägger DVL att förtydliga på vilket sätt redovisningen är av betydelse för handläggningen av målet.

För det fall domstolen medger att DLV får genomföra redovisningen hemställer Trafikverket att ges i vart fall motsvarande utrymme i förhandlingsordningen för genomgång av de hydrogeologiska förhållandena i reservaten och hur inhämtade data har bedömts och hanterats i ansökan.

Trafikverket önskar i så fall att få besked skyndsamt, för att hinna förbereda en sådan presentation.

Här kräver TRV domstolstid att få filibustra om fritt valt ämne om DLV får bemöta TRV:s angrepp.

Slutresultatet blev att en reservdag fick tillgripas, till stor del för att två av TRV:s konsulter skulle hålla timslånga föredrag om ovan nämnda frågor som inte överklagats.

DLV fick däremot inte tid för att bemöta TRV:s angrepp.

Om miljödomstolarnas uppgift är att skydda TRV:s hydrogeologiska beräkningar från kritik kan de sägas ha gjort ett gediget arbete.

Andra erfarenheter av miljödomstolarna

Fyra professorer som varit inkallade som experter i Bungemålet skrev den 2 september 2014 ett öppet brev om hur Mark- och miljödomstolen har behandlar deras yttranden. Brevet finns tillsammans med ett radioreportage på länken

<http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=94&artikel=5954752>

och avslutas :

"Mark- och miljödomstolens hantering av våra sakliga bedömningar och vår kritik av underlagsmaterial och analyser väcker allvarliga frågor om domstolens tekniska kompetens. Den tidsmässigt långa rättsliga hanteringen har successivt gett ny information som snarare ökat osäkerheten om tåktens effekter. Det är allvarligt att MD kommit fram till ett tekniskt och rättsligt ställningstagande som utan motivering eller någon som helst redogörelse för de vetenskapliga tvivel som framförts, går emot samtlig utomstående vetenskaplig expertis trots att högsta domstolen krävt en vetenskaplig bedömning utifrån bästa information och kunnande och att alla rimliga tvivel om påverkan på området måste kunna skingras.

Vi vill med detta öppna brev fråga om detta domstolsförfarande anses vara etiskt och rättsligt korrekt? Om så skulle vara fallet är det framledes helt meningslöst att vetenskapssamhället deltar med kunskaper och bedömningar i miljömål. Eftersom våra bedömningar och beräkningar eller ens deltagande i domstolsförhandlingen inte framgår av domen 2014-06-02 vill vi, samtliga externa hydrogeologiskt vetenskapliga experter som granskat ärendet framhålla vår entydiga slutsats att det med nuvarande underlagsmaterial och beräkningar inte alls går att utesluta betydande hydrologiska och hydrogeologiska effekter av kalkstensbrytning på Bunge Ducker, norra Gotland. Om MD anser att våra sakliga expertbedömningar och beräkningar är felaktiga bör detta således anges i domslutet, liksom varpå detta baseras. Annars väcks lätt misstankar att MDs domslut skulle kunna baseras på annat än tekniskt sakliga och därpå rättsliga ställningstaganden.

*Bo Olofsson
Professor i Miljögeologi*

*Gert Knutsson
Professor em. i Kulturteknik*

*Georgia Destouni
Professor i Hydrologi, hydrogeologi
och vattenresurser*

*Vladimir Cvetkovic
Professor i Vattenvårdsteknik"*

Jenny Jewert tog i DN den 2015-08-31 upp hur illa rättssystemet fungerat i Bungemålet och hur stor makt som de tekniska råden har när det gäller naturvetenskapliga frågor

<http://www.dn.se/ledare/kolumner/jenny-jewert-slutet-pa-den-solkiga-historia-om-ojnareskogen/>