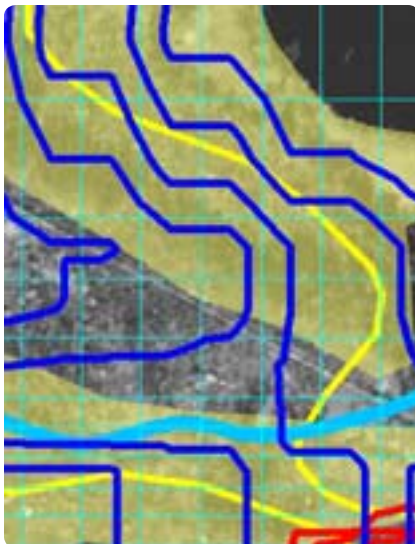


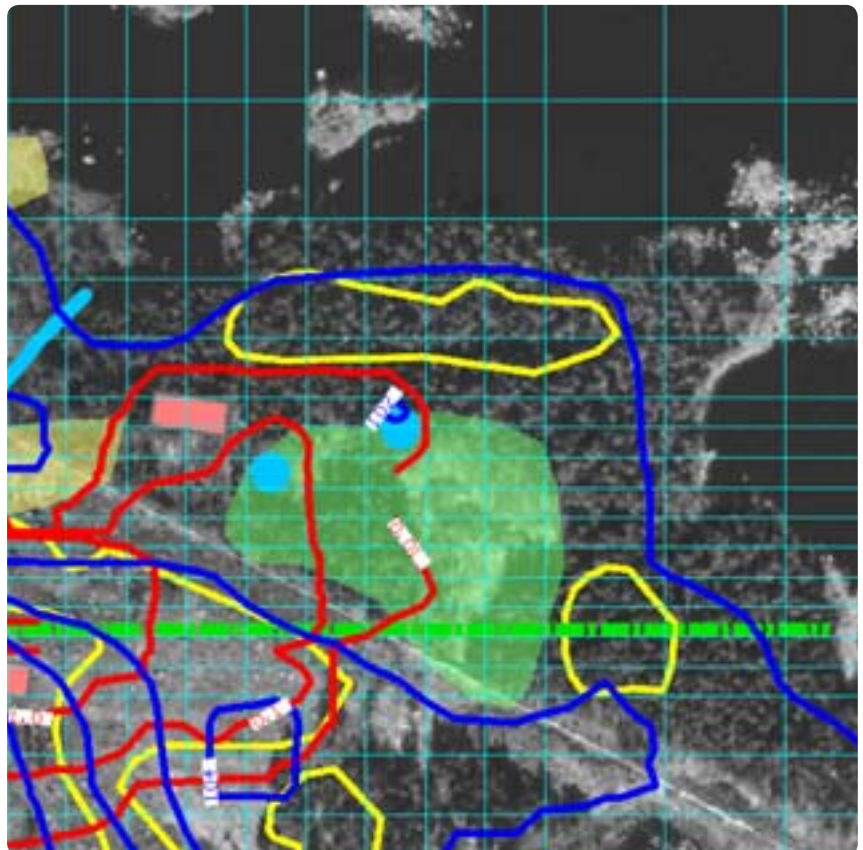
# Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 1

Förstudie - Användning av numeriska beräkningsmodeller för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten

RAPPORT 5541 • MARS 2006



Kunskapsprogrammet



# Modeller för transport och spridning av föroreningar – fas 1

Förstudie – Användning av numeriska beräkningsmodeller för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten

Mattias von Brömssen, Ramböll Sverige AB  
Lisa Gunnemyr, Ramböll Sverige AB  
Ola Lindstrand, Ramböll Sverige AB  
Sven Jonasson, Geo Logic i Göteborg AB

**Beställningar**

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: [natur@cm.se](mailto:natur@cm.se)

Postadress: CM-Gruppen, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: [www.naturvardsverket.se/bokhandeln](http://www.naturvardsverket.se/bokhandeln)

**Naturvårdsverket**

Tel 08-698 10 00, fax 08-20 29 25

E-post: [natur@naturvardsverket.se](mailto:natur@naturvardsverket.se)

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se)

ISBN 91-620-5541-0.pdf

ISSN 0282-7298

Elektronisk publikation

© Naturvårdsverket 2006

Tryck: CM Digitaltryck AB

Omslagsbild: Mattias von Brömssen, Ramböll Sverige AB

# Förord

Ett av riksdagens miljömål är Giftfri miljö, och i detta mål ingår att efterbehandla och sanera förorenade områden. Ett hinder för ett effektivt saneringsarbete som har identifierats är brist på kunskap om risker med förorenade områden och hur de bör hanteras. Naturvårdsverket har därför initierat kunskapsprogrammet Hållbar Sanering.

Den här rapporten redovisar projektet ”Modeller för transport och spridning av föroreningar – fas 1” som har genomförts inom Hållbar Sanering. Rapporten behandlar användningen av numeriska grundvattenmodeller i Sverige för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten.

Författare till rapporten är Mattias von Brömssen, Lisa Gunnemyr och Ola Lindstrand, samtliga på Ramböll Sverige AB, samt Sven Jonasson på Geo Logic i Göteborg AB. Naturvårdsverket har inte tagit ställning till innehållet i den här rapporten. Författarna svarar själva för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Ett stort tack riktas till de organisationer, företag och myndigheter som medverkat med värdefull kunskap vid intervjuer och under workshops. Ett speciellt tack riktas till Ivars Neretnieks som fungerat som Hållbar Sanerings kontaktperson för detta arbete.

Naturvårdsverket februari 2006



# Innehåll

<b>Förord</b>	<b>3</b>
<b>Innehåll</b>	<b>5</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>6</b>
<b>Summary</b>	<b>8</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>10</b>
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte	11
1.3 Avgränsning	11
<b>2 Genomförande</b>	<b>13</b>
2.1 Intervjuer	13
2.2 Aktörer	13
2.3 Workshop, nordiskt utbyte	13
2.4 Litteratursökning	14
<b>3 Resultat och diskussion</b>	<b>15</b>
3.1 Kunskapsläge, Sverige	15
3.2 Syntes och kunskapsläge i Norden	26
3.3 Arbeten med grundvattenmodeller	29
<b>4 Slutsatser</b>	<b>35</b>
<b>5 Rekommendationer</b>	<b>37</b>
<b>6 Referenser</b>	<b>39</b>
<b>Bilaga 1</b>	<b>40</b>
Enkät	
<b>Bilaga 2</b>	<b>46</b>
Kontaktade aktörer	
<b>Bilaga 3</b>	<b>47</b>
Grundvattenmodellering: Checklista för utförare och beställare	

# Sammanfattning

Grundvattenmodeller kan vara mycket kraftfulla verktyg att beräkna och visualisera grundvattenflöde och föroreningstransport, speciellt vid akvifärer med komplicerad geometri. I rätt sammanhang och rätt använda är grundvattenmodeller viktiga och kostnadseffektiva verktyg för att ta fram beslutsunderlag beträffande olika grundvatten- och föroreningsfrågor. Detta gäller särskilt där skyddsobjekten är stora, tydliga och värdefulla.

Idag saknas emellertid kunskap och indata för att allmänt i Sverige med hjälp av befintliga numeriska beräkningsmodeller, med precision kvantifiera och prediktera transport av föroreningar i grundvatten.

Föreliggande rapport syftar till att beskriva den erfarenhet och kunskap om sådan modellering, för svenska förhållanden, som finns i ”branschen” och vid universitetet. Dessutom föreslås en metodik för användningen av dessa modeller i samband med miljöriskbedömningar för förorenade områden samt så redovisas ett protokoll för hur osäkerheter kan beskrivas. Vidare föreslås ett antal rekommendationer för fortsatta arbeten inom ämnesområdet i Sverige.

För att få en bild av statusläget i Sverige utfördes intervjuer med ca 25 nyckelpersoner med direkt erfarenhet i ämnet. Ett mindre antal aktörer i Danmark, Finland och Norge kontaktades även för att erhålla underlag för en syntes av statusen i respektive land. Utöver detta genomfördes en litteratursökning av svenska erfarenheter av modellering av föroreningsspridning med grundvatten under svenska förhållanden.

Sammanfattningsvis kan sägas att många aktörer använder grundvattenmodeller vid projekt med anknytning till förorenad mark. Detta sker dock oftast på ett kraftigt förenklat sätt. Det är vanligt att använda enbart en flödesmodell, samt partikelspårning. Masstransportmodeller används i princip bara i FoU-projekt och för hypotetiska scenarion (där man inte behöver eller kan kalibrera) eller alternativt mycket stora projekt. Oftast tvingas man bortse från heterogeniteter i förenklade modeller. Osäkerheter hanteras sällan systematiskt men ofta genom en förenklad känslighetsanalys.

Sveriges geologi med tämligen små avrinningsområden och akvifärer, begränsad användning av grundvatten för kommunalt dricksvatten, liksom svårigheter att kommunicera mervärden med uppdragsgivare synes vara orsaker till en begränsad användning av grundvattenmodeller i Sverige.

Olika mervärden är förknippade med grundvattenmodeller såsom att man kan pröva hypoteser samt att man tvingas skapa en vattenbalans för systemet. Övriga simuleringsresultat erhålls relativt frekvent. Detta torde vara ett mervärde då detta tyder på att utan användning av modellen skulle relevant information ha förbigåtts. Modeller anses även vara mycket pedagogiska för redovisning av resultat.

I andra länder (t.ex. Danmark) har nyttan av modeller varit mer uppenbar och därför har modeller kommit mer till användning.

Erfarenhetsvärden på de olika parametrar som behövs vid masstransportmodellering efterfrågas av många aktörer. Även baskunskaper om dessa processer samt hantering av heterogeniteter och parameterisering efterfrågas. Det finns även ett stort behov av erfarenhetsspridning och – återföring beträffande grundvattenmodellering i allmänhet och transportmodellering i synnerhet. Vidare saknas lättanvänt kalibreringsverktyg eller protokoll. Protokollet bör innehålla information om vad man behöver för typ av information i relation till olika osäkerheter.

Det bedöms inte nödvändigt att utveckla (särskild) generell programkod i Sverige för de vanliga tillämpningarna i branschen.



# Summary

Groundwater models can be very powerful tools to compute and visualize groundwater flow and contaminant transport especially in aquifers with complex geometry and complex groundwater flow patterns. Used for the right projects and in a proper way groundwater models could be very important and cost-effective tools to produce basis for decision on groundwater and contaminant issues.

Today, there is still not sufficient knowledge and available input data in Sweden to predict and quantify transport of contaminants in groundwater with high precision using existing numerical simulation models. The aim of this report is to describe the present experience of models for Swedish geological and contaminant conditions, at Swedish universities and among others professionals. In addition, a methodology on how to use groundwater models when working with environmental risk assessment for contaminated area is presented. A scheme describing uncertainties is also suggested. Finally, recommendations for further work within this field are suggested.

In order to obtain a picture of the current situation regarding use of numerical groundwater models in Sweden, interviews were conducted with 25 key persons with direct experience in the area. A few actors in Denmark, Finland and Norway were also contacted in order to get a picture of the status in each of these countries. Moreover, a search for literature related to modelling of contaminants in groundwater in Sweden was made.

In conclusion, it can be stated that many different “actors” use groundwater models in projects related to contaminated land. Often, models are used in a highly simplified manner. It is custom to only use a flow model together with particle tracking. Modelling of mass transport is mainly used in research projects and in hypothetical scenarios (when there is no need to, or when it is not possible to calibrate). Heterogeneities are in many cases not accounted for in these simplified models. Uncertainties are rarely dealt with in a systematic way. More often a simplified uncertainty analysis is conducted.

The rather limited use of models in Sweden is believed to arise partly from complex hydrological environments in Sweden with fairly small drainage basins and aquifers, and partly from the limited use of groundwater as a drinking water resource. Another reason for the limited use is thought to be difficulties of communicating the benefits of the models to clients. With small aquifers the cost might be rather high compared to the benefit from using groundwater modelling.

Some benefits arising from the use of groundwater models are the possibility to test hypotheses, combined with the fact that the modeller is forced to create a water balance for the system. Unexpected simulation results are relatively often obtained. Models are also considered to be a good presentation tool.

Experience values for the various parameters that are used in modelling of mass transport (such as dispersivity and diffusion coefficients) are asked for by many actors. In addition, basic knowledge about the process of transport of contaminants, handling of heterogeneities and parameterisation are demanded. These

are also great need to spread experiences of groundwater modelling in general, and of mass contaminant transport modelling in particular. Moreover, there is a need for an easily used tool or protocol for calibration. The content of such a protocol could be guidelines on what information and data that is necessary in relation to various uncertainties.

It is not considered necessary to develop a general (specific) program code in Sweden for the common applications in the business, even though some geological features (like glaciated terrain) are not very frequent in many other parts of the world.

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Grundvattenmodeller kan vara mycket kraftfulla verktyg att beräkna och visualisera grundvattenflöde och föroreningstransport, speciellt vid akvifärer med komplicerad geometri. I rätt sammanhang och rätt använda är grundvattenmodeller viktiga och kostnadseffektiva verktyg för att ta fram beslutsunderlag beträffande olika grundvatten- och föroreningsfrågor. Detta gäller särskilt där skyddsobjekten är stora, tydliga och värdefulla.

Idag saknas emellertid kunskap och indata för att allmänt i Sverige med hjälp av befintliga numeriska beräkningsmodeller, med precision kvantifiera och prediktera transport av föroreningar i grundvatten.

Det kan konstateras att modeller för beräkning av transport och spridning av föroreningar funnits tillgängliga relativt länge, men att användningen begränsats av att dessa kräver tämligen stor mängd av indata för att modellerna skall kunna ge en rimligt säker prognos av framtida förhållanden. Nödvändiga indata består av a) hydrogeologisk information, b) hydrologisk information c) naturlig grundvattenkemi, d) information om kvarvarande föroreningsmängder, e) information om kemiska förhållanden i kvarvarande förorenade massor och f) laknings- och adsorptionsegenskaper för aktuella föroreningar i samverkan med aktuella geologiska material och aktuell grundvattenkemi.

Vid användning av beräkningsmodeller är att det är svårt att kunna skaffa tillräcklig information om samtliga av parametrarna under a)-f) ovan. Sällan har man möjlighet att över tid följa en förändring eller spridning av föroreningarna, så att man kan kalibrera modellen på ett säkert sätt. Om modellen inte har kunnat kalibreras tillräckligt väl blir prognoser med hjälp av modellen osäkra, oavsett vilken modell (programvara) som används.

Det som kanske är minst svårt att skaffa information om är de hydrauliska och hydrologiska förhållandena. Detta beror på att det finns relativt omfattande kompetens (bland konsulter och forskare), och väl etablerade metoder för att bestämma dessa parametrar på plats vid det aktuella objektet. Vad som saknas här är många gånger tid och budget. Det bör dock konstateras att det inte alltid är mängden av hydrogeologisk och hydrologisk information som är kritisk, utan att rätt information inhämtas.

Utan en god hydraulisk beskrivning av ett objekt, och hydrauliskt väl kalibrerad modell, är det i stort sett meningslöst att koppla på moduler för beräkning av kemikalietransport, fastläggning och nedbrytning. Det kan även konstateras att det idag är lättare att skaffa programvaror för grundvattenmodellering än god erfarenhet av denna typ av modellering (vilket förhållande dock kommer att rätta till sig med tiden).

## 1.2 Syfte

Syftet med föreliggande projekt är att:

- 1) Studera hur numeriska beräkningsmodeller används idag i samband med miljöriskbedömningar, dels i "branschen" och dels i den "vetenskapliga världen" och ge en statusbeskrivning av detsamma.
- 2) Ge förslag på en metodik hur numeriska beräkningsmodeller kan användas i samband med utredningar av förorenad mark samt att ta fram ett protokoll för hur osäkerheter skall beskrivas för dessa beräkningar. Metodik i detta sammanhang kan t.ex. vara scenarioanalyser, beräkning av worst-case, risk att överskrida riktvärden, etc.
- 3) Föreslå riktlinjer för fortsatt arbete och metodutveckling.

## 1.3 Avgränsning

Följande avgränsningar har gjorts:

- 1) Projektet behandlar endast användningen av numeriska grundvattenmodeller. Andra typer av modeller tas inte upp.
- 2) Med föroreningsspridning avses endast spridning ifrån en föroreningskälla i grundvatten. Andra spridningsvägar behandlas ej.
- 3) Endast spridning av föroreningar förorenade från områden enligt SNV:s definition<sup>1</sup> behandlas. Det skall dock påpekas att andra typer av projekt, såsom riskbedömningar för t.ex. farligt godsolyckor eller andra potentiella olycksscenarier också kan vara värdefulla för att skaffa erfarenheter från, och att jämföra med.

### **Faktaruta – Numeriska beräkningsmodeller för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten**

Med en numerisk modell menas här att man (med hjälp av en dator) på numerisk väg löser ett system av ekvationer som tillsammans beskriver de fysikaliska förlopp man vill beskriva.

En numerisk beräkningsmodell för transport av föroreningar i grundvatten brukar inkludera ekvationer som kan beskriva spridning av ett föroreningsämne genom grundvattenströmning (konvektion), molekylär diffusion och omblandning på grund av inhomogeniteter i marken (dispersion), fastläggning genom sorption till fast markmaterial samt någon form av nedbrytning. Det förekommer även numeriska modeller som i detalj beskriver komplexa kemiska reaktioner mellan olika ämnen som transporteras med grundvatten, eller avångning av flyktiga ämnen. Dessa olika funktioner kan inkluderas i ett och samma program, eller finnas i program eller programmoduler som samverkar med ett huvudprogram som beskriver grundvattenströmningen.

---

<sup>1</sup> Ett förorenat område är ett område, en deponi, mark, grundvatten eller sediment som är så förorenat att föroreningshalterna påtagligt överskrider lokal/regional bakgrundshalt. Det är ett område som är förorenat av en eller flera lokala punktkällor (SNV 1999).

### Faktaruta – Grundvattenmodellering

Den viktigaste delen vid upprättandet av en grundvattenmodell är att skapa en konceptuell (beskrivande) hydrologisk och hydrogeologisk modell över området. Den konceptuella modellen används därefter som underlag vid skapande av en numerisk grundvattenmodell vilken senare kan utnyttjas som underlag för beräkningar och/eller bedömningar av föroreningarnas spridningsförutsättningar.

För att skapa en konceptuell hydrologisk och hydrogeologisk modell krävs en god förståelse av:

- geologiska förhållanden,
- anläggningar som ändrar de naturliga grundvattenflödena såsom ledningar och ledningsgravar, schakter etc,
- områdets vattenbalans, d v s nederbörd, grundvattenbildning, flöde i ytvattendrag, befintliga grundvattenuttag, etc,
- grundvattennivåer, -flöden och vattenstånd i vattendrag,
- grundvattenkemisk karaktärisering.

En sammanställning av insamlad data ger underlag för skapande av en hydrogeologisk konceptuell modell. Den konceptuella modellen är tredimensionell, redovisas oftast i form av karta i plan och profil, samt beskrivningar i text. Vidare beskrivs de osäkerheter som den konceptuella modellen innehåller.

Baserat på den konceptuella hydrogeologiska modellen byggs därefter en numerisk flödesmodell upp i en programvara. Modellen lagerindelas på lämpligt sätt utifrån de geologiska förutsättningarna. Grundvattenmodellen avgränsas geografiskt utifrån de hydrauliska förutsättningarna. Följande steg brukar ingå i upprättandet av grundvattenmodellen:

- Avgränsning av modellen i plan och profil, inklusive val av lagerindelning, mäktigheter på ingående lager och hydrauliska gränser.
- Ansättande av s k randvillkor, akvifärens egenskaper, m.m.
- Kalibrering av flödesmodellen mot kända grundvattennivåer och – flöden, genom successiv anpassning och justering av hydrauliska konduktiviteter, grundvattenbildning, och eventuella grundvattenuttag inom förväntade intervall.
- Upprättande av slutlig flödesmodell för rådande förutsättningar.

Flödesmodellen kan även användas för prognostisering av framtida, förändrade, förhållanden alternativt för rent hypotetiska fall.

Baserat på vilken flödesmodell som utnyttjas kan sedan olika moduler "kopplas på" för att beräkna transport av föroreningar som tar hänsyn till diffusion och dispersion, nedbrytning, kemiska reaktioner, avångning, sorptionsprocesser etc. En av de vanligaste och enklaste modulerna är den av USGS utvecklade programkoden MODPATH som endast tar hänsyn till konvektion. Modulen resulterar i s k partikelspårning, dvs. man släpper ett antal partiklar i flödesmodellen och ser efter vart de tar vägen samt deras hastighet.

Det finns även andra typer av programvaror som studerar några processer specifikt, t.ex. program för beräkning av geokemiska jämvikter (se vidare Crawford, 1999) eller för simulering av a k "air-sparging" (Badiner och Peña Duarte, 2001).

## 2 Genomförande

### 2.1 Intervjuer

För att få en bild av statusläget i Sverige beträffande användning av grundvattenmodeller för förorenings spridning utfördes intervjuer med ett antal personer på företag, myndigheter och organisationer runt om i landet som bedömdes ha kunskap, erfarenheter och åsikter om det aktuella ämnet. För att lättare sammanfatta och strukturera den erhållna informationen vid intervjuerna konstruerades en enkät som användes vid alla intervjuerna. Frågorna i enkäten kan grupperas i följande kategorier:

- 1) Frekvens av användning
- 2) Typ av föroreningsobjekt
- 3) Programvara/programkod
- 4) Kvalitet på indata
- 5) Hantering av osäkerheter
- 6) Mervärden/Nackdelar/Begränsningar
- 7) Erfarenhetsåterföring
- 8) Behov av utveckling

Enkäten återfinns i sin helhet i bilaga 1.

### 2.2 Aktörer

Totalt utfördes ca 25 st intervjuer. De tillfrågade är representanter från högskolor och tekniska universitet, länsstyrelser, byggföretag, större och medelstora konsultföretag, enmanskonsulter, SGU, SKB, Banverket, Vägverket samt Fortifikationsverket. Urvalet styrdes av målsättningen att få en bred representation av personer som från olika perspektiv har åsikter om eller kunskaper och erfarenheter av förorenings spridning i grundvatten. Trots denna målsättning är vi medvetna om att vi kan ha missat många personer som på olika sätt skulle kunna ha bidragit med värdefull kunskap. Vi hoppas ändå att vi fått genom detta urval lyckats spegla statusläget på ett någorlunda heltäckande vis. De företag och organisationer som intervjuats återfinns i bilaga 2.

### 2.3 Workshop, nordiskt utbyte

En workshop genomfördes i Virum, Danmark, i början av oktober. Närvarande på mötet var förutom projektgruppen också några personer som kan bedömas tillhöra nyckelaktörer inom grundvatten- och föroreningsmodellering i Sverige, Danmark och Finland.

Syftet med mötet var dels att diskutera och få feedback på projektidén och projektrelevansen, arbetssätt, enkätens upplägg samt sammansättningen av personer som skulle kontaktas i intervjuerna, dels att få en syn på statusläget beträffande användning av spridningsmodeller i Danmark och Finland. Varje deltagare presen-

terade dessutom två aktuella projekt där föroreningsspridning modellerats. Under mötet inhämtades också relevant litteratur, manualer, protokoll etc.

## 2.4 Litteratursökning

En litteratursökning avseende publicerade artiklar och annan litteratur som behandlar användandet av numeriska modeller för beskrivning av föroreningstransport under svenska förhållanden har genomförts genom sökning i LIBRIS samt vid KTHB.

För motsvarande litteratursökning för Finland, Norge och Danmark har kontakt tagits med nyckelaktörer för information om vilka sammanställningar, synteser, riktlinjer m.m. som finns i respektive land.

## 3 Resultat och diskussion

### 3.1 Kunskapsläge, Sverige

Sammanställningen av kunskapsläget i Sverige baseras på de svar som erhöles vid intervjuerna. Rubrikerna följer i stort upplägget på frågorna i enkäten.

#### 3.1.1 Vem använder modeller/aktörer?

I princip alla större och medelstora konsultföretag samt flera enmanskonsulter har kunskap om och använder grundvattenmodeller regelbundet i sin verksamhet. Vanligaste användningsområdet är dock inte modellering av förorenings-spridning utan ”vanliga” flödesmodeller ( t.ex. för bedömning av inläckage i schakter, effekter av vattenuttag, etc.)

En slutsats som kan dras är att grundvattenmodellering i Sverige idag tycks vara en ”specialistverksamhet”, koncentrerad till ett fåtal personer på de större och medelstora företagen samt till enmanskonsulter. Även om de flesta hydrogeologer på de större och medelstora konsultföretagen har kommit i kontakt med modellering under utbildningen, tycks det vara relativt få som får möjlighet att utveckla kunskaperna i arbete i projekt. Det är ovanligt att en hel grupp har kunskap om modellering, försvinner nyckelpersoner försvinner en stor del av kompetensen från företaget.

De kontaktade myndigheterna kommer i kontakt med modeller främst i sin roll som beställare ( t.ex. Banverket, Vägverket) eller vid granskning av konsultutredningar i tillstånds- och tillsynsarbete ( t.ex. kommuner och länsstyrelser). Av de tillfrågade myndigheterna har endast SGU och SKB egen erfarenhet av modell-användning inom egen organisation.

#### 3.1.2 Vem beställer modeller?

Exempel på beställare av projekt där grundvattenmodeller är en del av projekten är SGU (oljelager och efterbehandling), SKB, Fortifikationsverket, Banverket, Vägverket (vattenskyddsområden), deponiägare, täktägare, industrier, FoU-projekt (FORMAS, VR, SGU, m.fl.).

#### 3.1.3 Objekt och problemställningar

Generellt kan sägas att bruket av numeriska beräkningsmodeller i Sverige omfattar de flesta olika typer av objekt och problemställningar. Modeller används för att beskriva föroreningstransport i grundvatten från aktiva och nedlagda deponier, från gruvavfall, bergrumslager för petroleumprodukter, olika infrastrukturprojekt och andra förorenade områden. Vanligt förekommande problemställningar är även sådana där en framtida situation simuleras, t e x vilka risker är förknippade med ett eventuellt föroreningsspill som riskerar nå en grundvattentäkt, samt effekter av olika efterbehandlingsåtgärder såsom täckning, hydraulisk avledning, etc.

Typobjekt där användningen däremot synes ovanligare är spridning av föroreningar från förorenade fyllnadsmassor, samt för innerstadsobjekt (särskilt gäller



detta storstäder). Detta torde bero på att grundvattenskyddsintresse saknas då grundvattnet redan anses obrukbart, alternativt att människan är det primära skyddsobjektet och exponering via dricks-/grundvatten saknas varför förorenade massor tas bort/efterbehandlas på andra grunder.

För exploateringsprojekt får ofta försiktighetsprincipen mycket stor vikt i miljöriskbedömningar. Vanligen tas därför beslut om omhändertagande av så mycket av de förorenade massorna, att studier av föroreningsspridning saknar relevans (då ju källtermen ändå tas bort).

Två problemägare har mer än andra använt sig av numeriska beräkningsmodeller (själva eller genom konsult) för beskrivning av föroreningstransport i grundvattnet. Dessa är SGU och SKB. SGU har frekvent använt grundvattensimulering för att beskriva effekter av efterbehandlingsåtgärder (s.k. hydraulisk avledning) samt spridning av föroreningar kring bergrum utnyttjade för lagring av petroleumprodukter. SKB har använt numeriska beräkningsmodeller för beskrivning av transport av lösta radionukleider i grundvatten i sprickigt berg. För dessa objekt har problemägaren ansett det nödvändigt att använda dylika verktyg för att lösa problemställningarna samt för att skapa en robust och trovärdig utredning.

Få utredningar med detaljerad indata rörande andra faktorer än flöden finns, undantag är främst stora projekt t.ex. Hallandsåsprojektet, SKB och Kvarntorp (MGG, 1998; SKB 2004; Liedholm et al, 2000). En anledning till detta kan vara att avrinningsområdena och magasinen/akvifererna i Sverige ofta är så små att det sällan lönar sig att sätta upp en grundvattenmodell. En enkel konceptuell modell med tillhörande analytiska beräkningar väljs ofta istället.

### 3.1.4 Programkoder och -varor

De programvaror som används mest är baserade på Modflow som flödesmodell. Andra programvaror använd mest för FoU och/eller stora projekt som Hallandsåstunneln och Citytunneln i Malmö (där MIKE SHE har utnyttjats i stor omfattning).

Vilken programvara som väljs och används styrs för flertalet konsulter av tillgänglighet, brukarvänlighet, möjlighet till och kostnad för support, samt programvarans pris (inköp och/eller årlig licensavgift).

Vid FoU är priset för programvaran mest avgörande, i kombination med programvarans prestanda och möjlighet att modifiera (d.v.s. öppen källkod). Ofta används inom FoU programvara som är mer specialiserad, och framtagen av forskarkolleger. Dessa programvaror är samtidigt ofta mindre användarvänliga, eftersom denna aspekt inte haft första prioritet vid utvecklingen.

#### **Kommentar – Finita element respektive finita differanskoder**

Allmänt kan sägas att mer användarvänliga program utvecklas av enbart ett mindre antal aktörer. Utvecklingsarbetet styrs idag av efterfrågan, som är begränsad (jämfört med exempelvis generella kontorsprogram och administrativa program).

Under årens lopp har satsningar gjorts att ta fram ny programvara för varierande geomiljöapplikationer på nationell bas i olika länder. Dessa programvaror har överlevt och anpassats till nya datormiljöer och operativsystem (samt fått större spridning) enbart om de har tagits fram och därefter stöttats av större institutioner (exempelvis USGS), eller haft kommersiellt intresse (exempelvis Visual Modflow, med Modflow från USGS som grund).

Exempel på tidigare i Sverige mycket använd och kompetent programkod för flödessimulering (baserad på Finit Elementmetod) är GEOFEM-G som fanns tillgänglig att köra via terminal mot Göteborgs Datacentra och AQUIFEM på KTH. När personatorerna tog över efter stordatorerna för kommersiella simuleringar, "försvann" dessa programvaror.

Slutsatsen av ovan är att det för att utveckla användarvänliga produkter krävs stora insatser, vilket medför att det finns få alternativa sådana. Det är dessa få program som används i branschen. Har man lärt sig ett program håller man dessutom gärna fast vid detta, även om man byter arbetsplats. Kostnaden för upplärning på en för användaren ny programvara är ofta större än kostnaden för inköp av en för den nya arbetsplatsen ny programvara.

Det finns en fara med att många ("alla") kör samma programkod, om koden innehåller någon "bugg". Risken för buggar är sannolikt störst i samband med nya modellversioner. Viktigt är därför att simuleringsresultat kontrolleras m.h.a. analytiska metoder, överslagsberäkningar och rimlighetskontroll.

Orsaken till att Modflow (och de program som samverkar med detta) dominerar på marknaden är bland annat att programmet var ett av de första program som kunde hantera flöden i 3 dimensioner och de flesta normalt förekommande randvillkor, samt att det till programmet kunde kopplas moduler för partikelspridning (Modpath) och kemikalieföroreningstransport (MT3D). Vidare var programmet modulärt uppbyggt, fritt tillgängligt och med öppen källkod. Se McDonald & Harbaugh, 1984. Detta gjorde att många olika organisationer och företag började utveckla mer brukarvänliga användargränssnitt ("user interface") för in- och utdatahantering, eftersom programmet i originalversion var avsett för "batch-körning". Några av dessa programvaror har vidareutvecklats, bland annat Visual Modflow.

Modflow är ett program baserat på Finit Differens Metod (FDM). Förutom grundvattenmodeller baserade på FDM finns även numeriska grundvattenmodeller baserade på Finit Element Metod (FEM). Finita elementmetoden ger möjligheter till friare och mer realistisk geometrisk beskrivning av aktuellt objekt (akvifer), varför det kan vara lättare att överföra en konceptuell grundvattenmodell till FEM än till FDM, inte minst gäller detta svensk geologi. Det finns ett mellanting mellan en helt renodlad 3D FEM-modell och en dito 3D FDM-modell. Denna modelltyp kallas hybridmodell, och består av ett antal lager av 2D FEM-modeller som m.h.a. finit differensmetod kopplas ihop till en 3D modell. Beträffande icke-kontinuerliga geologiska lager redovisas dessa på samma förenklade och begränsade sätt i både FDM-modeller och hybridmodeller. Hybridmodeller tycks ofta (oegentligt) benämnas bara "FEM-modell" och programvara för hybridmodeller verkar vid en snabb genomgång på Internet idag dominera över programvara för reella 3D FEM-modeller.

Varför har då FEM-modeller inte fått större spridning? Skälen till detta torde bland annat vara att det är lättare att förstå uppbyggnad av och hur beräkningar sker hos en FDM-modell. Vidare krävs något större minnes- och beräkningskapacitet hos datorn för att hantera en FEM-modell jämfört med en FDM-modell. Idag är detta inget problem, eftersom även en tämligen ordinär PC lätt klarar av att hantera även stora FEM-modeller, men när de första numeriska grundvattenmodellerna utvecklades för mer än 20 år sedan var detta av avgörande betydelse. På den tiden var datorkapacitet en avgörande faktor, och detta bidrog starkt till att FDM-modeller fick en större spridning än FEM-modeller.

Om man exempelvis har vattenförande strukturer (sedimentfyllda dalgångar eller krosszoner) som inte följer modellens huvudriktningar, eller lager som tunnas ut och slutar, är detta generellt sett lättare att beskriva i en renodlad FEM-modell än i en FDM-modell. (Ett exempel på användning av FEM ges i Wall och Andersson, 1999).

### 3.1.5 Komplexitet

En flödesmodell upprättas i princip alltid som grund för beräkning eller beskrivning av föroreningstransport. Undantag finns, t.ex. där transporten beräknas med hjälp av en programkod som utgår från jämviktsmodellering (programvaror typ PHREEQC och motsvarande). Flödesmodellen kan beräkna vattenbalans, strömningsvägar, storlek på flöden och hastigheter, grundvattenbildning, in- och utströmningsområden, samt användas vid bestämning av akvifärens egenskaper och så vidare.

Till flödesmodellen kopplas oftast partikelspårning för att åskådliggöra flödesvägar och beräkning av transporttider för grundvattnet. Hänsyn tas således inte till diffusion, dispersion, sorption eller någon annan process vid dessa beräkningar.

Beräkning av föroreningstransport med hänsynstagande till diffusion, dispersion, sorptionsprocesser, nedbrytning, avångning etc. sker sällan utanför högskolor och universitet. I större projekt förekommer det dock såsom i Hallandsåsprojektet, SKB och för Citytunneln i Malmö.

Upprättande av transienta modeller sker även det sällan. En transient modell är en modell som beskriver tidsmässiga variationer av flöden, nivåer, transport m.m. En sådan modell kräver relevanta tidsserier att kalibrera modellen emot. Behov finns dock för användning av dylik modell då fluktuationer i grundvattennivåerna och interaktionerna med ytvatten och avrinning till stor del påverkar och bestämmer föroreningsspridningen.

Hantering av heterogenitet hos akvifären rörande hydraulisk konduktivitet, magasinsegenskaper, sorption, nedbrytning, osv. sker sällan på ett sofistikerat eller systematiskt sätt. Ej heller förs diskussion kring hur heterogeniteten vid parameteriseringen påverkar resultatet, annat än i forskningsprojekt.

Slutligen kan sägas att användningen av numeriska beräkningsmodeller för beräkning av föroreningstransport i Sverige sker på ett förenklat sätt där en flödesmodell upprättas, varefter föroreningstransporten beräknas analytiskt för t.ex. ett worst-case scenario eller dylikt. Anledningen till det ofta förenklade förfarandet beror sannolikt på ett flertal orsaker, framförallt saknas relevant platsspecifik indata men även s.k. erfarenhetsvärden. Vidare finns begränsad kunskap och erfarenhet avseende en mer sofistikerad användning av befintliga modeller. Avsaknad av erfarenhet kan botten i att svenska projekt tenderar till att vara mindre i sin omfattning jämfört med till exempel projekt i Danmark. Detta då svenska avrinningsområden är förhållandevis små, grundvattnet saknar samma skyddsvärde, grundvattenmagasinen är mindre, jordtäckan är tunna, etc.

### 3.1.6 Kvalitet och tillgång på indata

För att modellera och simulera ämnestransport i grundvatten krävs ett antal nödvändiga indata. Kvalitet, mängd och typ av indata styr hur komplex modellen kan vara samt vilka resultat som kan förväntas från modelleringsarbetet. En enklare flödesmodell som beskriver grundvattensituationen vid jämvikt kräver en mindre mängd indata. En mer komplex modell för transienta förhållanden (dvs. variation av flöden etc. med tiden) och där hänsyn dessutom tas till advektion, kemiska och/eller biologiska processer kräver betydligt mer indata (se exempel i Tabell 1).

**Tabell 1. Exempel på komplexitet för en grundvattenmodell och krav på indata, rand- och begynnelsevillkor.**

Komplexitet	Indata (minimum krav)	Rand- och begynnelse- villkor (minimum krav)	Kommentar
Flödesmodell	Transmissivitet, T ( $K \cdot b$ )	Grundvattenbildning Trycknivå(er) Flödesuttag (konstant tryck- nivå, flödesvillkor, uttags- brunnar etc.)	Jämvikt
Partikelspårning	Som ovan Effektiv porositet ( $n_e$ )	Som ovan	Jämvikt
Masstransport	Som ovan	Som ovan	Jämvikt
Diffusion	Konstanter/koefficienter för respektive process		
Dispersion			
Sorption	Specifik magasins- koefficient ( $S_s$ ) och/eller	Initiell(a) koncentration(er)	
Nedbrytning	vattenavgivningstal ( $S_y$ )		
Avångning			
Transient flödesmodell	Specifik magasinskoeffici- ent ( $S_s$ ) och/eller vattenavgivningstal ( $S_y$ )	Flödesuppgift <sup>1)</sup>	Transient <sup>2)</sup>

1) Krävs i princip för god kalibrering av modellen.

2) Varierar med tiden.

Genom inventeringsarbetet har tillgången och kvaliteten på de indata som används för modelleringsarbeten bedömts. Generellt kan sägas att kvalitet och mängd varierar stort mellan olika projekt, troligen beroende på storleken på desamma. Ändock kan vissa trender dras vilka presenteras i Tabell 2.

**Tabell 2. Tillgång och kvalitet på indata för grundvattenmodeller avsedda för simulering av föroreningstransport i grundvatten.**

Indata	Kommentar	Bedömning, tillgång/kvalitet
Topografi	Överytan/mark	Bra
Geologi	Geometri i rum av de geologiska bildningarna.	Bra - måttlig
Grundvattennivåer	Nivåer och fluktuationer.	Måttlig
Grundvattenkemi	t.ex. information som visar på hydraulisk kontakt mellan akvifärer, omsättning, etc.	Måttlig - dålig
Specificerat uttag / tillförsel av vatten	Uttag från brunnar, avsänkningar av grundvattennivåer, konstgjord infiltration etc.	Måttlig <sup>1)</sup>
Akvifärens hydrauliska egenskaper	Hydraulisk konduktivitet, magasinsegenskaper, effektiv porositet.	Måttlig <sup>2)</sup>
Koncentration föroreningskälla	Halter och antal provtagningar, koncentrationsvariationer och -fördelningar.	Måttlig - dålig
Spridnings och fastläggnings-egenskaper		Dåligt <sup>3,4)</sup>
Nedbrytning	Uppgifter om nedbrytning, konstanter alt	Dåligt <sup>3,4)</sup>
Magasinsegenskaper	(behövs vid transienta simuleringar och vid masstransportmodeller)	Dåligt <sup>4)</sup>
Grundvattenbildning (naturlig)	Ej med i enkät	Dåligt <sup>5)</sup>
Avrinningen eller nettonederbörd	Ej med i enkät	Bra – regionalt <sup>5)</sup> Dåligt – lokalt <sup>5)</sup>

1) Ett typiskt undantag är dock SGU:s bergrumsanläggningar där goda flödesuppgifter finns från bortpumpning av inströmmande grundvatten till bergrumsanläggningarna (samt kommunala vattenförsörjningsbrunnar och anläggningar för konstgjord infiltration).

2) Erfarenhet och kunskap finns dock.

3) Erfarenhet och kunskap synes i stor omfattning saknas.

4) Erfarenhet och kunskap om parameteriseringen av dessa typer av indata synes i stor omfattning saknas.

5) Arbets- och expertgruppens bedömning.

**Anm:** Observera att god information beträffande geologi, grundvattenuttag, akvifärens hydrauliska egenskaper och magasinsegenskaper brukar finnas vid och i anslutning till kommunala vattentäkter, men brukar oftast saknas i andra sammanhang.

### 3.1.7 Behandling av osäkerheter

Osäkerheter hanteras vanligen genom känslighetsanalys, beskrivning av osäkerheterna i text eller genom resonemang om hur säker eller osäker simuleringsresultatet är. I enstaka (sällan förekommande) fall hanteras osäkerheten genom Monte Carlo-analys eller motsvarande. Detta sker främst inom FoU-projekt (exempelvis Norman, 2004). Allmänna anvisningar om hur osäkerhet skall hanteras, eller struktureras saknas dock.

Osäkerheter behandlas ofta dåligt, men undantag finns ( t.ex. SKB). Olika konceptuella modeller provas sällan, troligen p g a detta blir tidskrävande. Möjligen

ställs olika konceptuella modeller upp och testas under modelleringsarbetet, men sällan redovisas mer än en ("slutgiltig") modell.

Bland annat på grund av att osäkerheter sällan beskrivs på ett systematiskt sätt kan det vara svårt för beställare och/eller granskare att bedöma tillförlitligheten hos en uppställd och använd grundvattenmodell.

Genom att beskriva osäkerheter på ett strukturerat och standardiserat sätt skulle det vara lättare att bedöma en utförd grundvattenmodellering, och även jämföra olika grundvattenmodelleringar. Någon form av standard eller protokoll skulle underlätta detta.

### *Kalibrering*

För att en modell skall kunna användas för prognoser måste den kalibreras. Detta kräver olika mängd information beroende på hur stor, respektive hur komplex, akviferen och problemställningen är. Problemet vid konsultuppdrag är ofta att befintlig information är liten eller otillräcklig. För att skapa fler observationspunkter i lämpliga lägen krävs nya borrhningar, och nya grundvattennivåbestämningar och/eller -provtagningar. Om tidsserier inte existerar är det även ofta svårt att få nya tidsserier med tillräcklig varaktighet, eftersom flertalet konsultuppdrag har en kort eller måttlig varaktighet i tid. Dessa förhållanden gör att många grundvattenmodeller är ofullständigt kalibrerade.

Beroende på typ av objekt finns olika information tillgänglig. Vid SOL/SGU:s oljelager har läckvattenflöden registrerats både under drift och efter att lagren tömts. Denna inflödesinformation i kombination med observerade grundvattennivåer har gjort det möjligt att kalibrera grundvattenflödesmodeller för flertalet av dessa anläggningar relativt bra.

Andra indata som ofta är osäkra eller tveksamma är akviferens magasinsegenskaper och vissa randvillkor (speciellt grundvattenbildning). Akviferens magasinsegenskaper kan bäst utvärderas från provpumpning eller annan väl definierad större hydraulisk påverkan. Vid förorenad mark kan det till och med vara direkt olämpligt att utföra sådana eftersom större föroreningstransport kan initieras, och uppumpat vatten kan behöva renas före utsläpp till ytvattenrecipient.

### *Validering*

Validering görs sällan beroende på brist på tid och pengar. Ibland är även den situation, eller de förlopp som simulerats, belägna så långt fram i tiden att det är svårt att validera modellen speciellt som det kan vara svårt att få fram resurser till oberoende fältförsök (provpumpning eller spårämnesförsök). SKB har gjort valideringar vid fältförsök.

### **3.1.8 Användning**

Användningen av numeriska modeller, för beskrivning av ämnestransport i grundvatten, i samband med miljöriskbedömningar kräver något större projekt och budget. Mindre projekt rymmer sällan modellering. I sådana fall där grundvatten är ett skyddsobjekt men där föroreningsmängden är liten prioriteras istället åtgärd/-

efterbehandling istället för en mer detaljerad riskbedömning då detta anses mer kostnadseffektivt.

Vidare krävs att grundvattnet är skyddsvärt för att modellering av detta slag skall komma ifråga. Vid en jämförelse med förhållandena i Danmark kan konstateras att grundvatten i större utsträckning används som dricksvatten samt att dess magasin/akvifärer generellt är större i utbredning och djup. Användningen, eller snarare bristen på användning, i kombination med att avrinningsområdena i Sverige är små och väl avgränsade av grundvattendelare samt att vi generellt har tunna jordtäcken medför troligen att grundvattnen i Sverige generellt anses ha lägre skyddsvärde än i Danmark. Detta påverkar frekvensen av användningen liksom komplexiteten av de uppställda modellerna.

För vissa problemställningar krävs dock användning av modelleringsverktyg för att lösa uppgifterna i projekten.

Generellt kan sägas att användningen av flödesmodeller (hydrologisk modell) som underlag för riskbedömning och beslutsunderlag förekommer någorlunda frekvent i större projekt och där grundvattnet anses vara skyddsvärt men att mass-transportmodeller förekommer endast i forskningsprojekt eller i undantagsfall. Anledningen till det senare torde vara att de svenska projekten sällan är så stora att de kan bära en trovärdig modellering. Här skall ihågkommas att för en sådan modell krävs, förutom betydligt mer tid framför datorn, dessutom oftast en större insats i fält.

Olämpliga geologiska förhållanden eller andra osäkerheter i indata har generellt sett inte setts vara orsak till att inte använda modellering. Modellering av ämnes-transport i grundvatten på industriområden där gamla VA-gravar, täckta diken och andra mänskliga ingrepp svårligen påverkar ett trovärdigt resultat från modellering kan ha medfört att detta sällan använts i dessa sammanhang (jämför med Kapitel 3.1.3).

Andra orsaker som medför att modellering inte används är svårigheter att påvisa mervärden och förväntade resultat. Genom modelleringsarbeten kan dock hypoteser bevisas eller förkastas. Dessutom framkommer ofta ny kunskap och oväntade resultat. Detta i sig är ett motiv för en mer frekvent användning.

Kompetensbrist är ett annat hinder för användning av modeller. Detta gäller både för beställare och utförare, och är särskilt uppenbart när det gäller mass-transportmodellering.

### **3.1.9 Mervärden, nackdelar och svårigheter**

#### *Mervärden*

Genom att använda grundvattenmodeller kan olika ”mervärden” erhållas jämfört med om ingen grundvattenmodell används.

Vissa problemställningar går inte att lösa utan att man använder sig av grundvattenmodellering. Genom att bygga upp en grundvattenmodell får man en kontroll av att man tänkt igenom problemställningen ordentligt och inte missar väsentlig och nödvändig information. I många fall får man simuleringsresultat som inte var förväntade, vilket kan innebära att man har tänkt fel och att den konceptuella mo-

dell som uppställd numerisk modell baseras på inte stämmer, eller att man har missbedömt påverkan av en viss parameter. Inte förväntade simuleringsresultat kan vara mycket klarläggande och lärorika.

Att bygga upp en grundvattenmodell och utnyttja denna för simuleringar är ett bra sätt att lära sig det aktuella systemet, och vad som påverkar vad. Vissa parametrar är relativt lätta att förstå betydelsen av, samt hur och hur mycket de påverkar resultatet. En sådan parameter är hydraulisk konduktivitet. Andra parametrar kan vara mer svåra att inse hur de kvantitativt påverkar simuleringsresultaten.

När väl en grundvattenmodell ställts upp, och fungerar är den ett verktyg som är mycket pedagogiskt. Modellen kan, även om den inte är väl kalibrerad, ge svar på frågor som: ”Vad händer om ...?”. Simuleringsresultat från en väl kalibrerad modell är dessutom tunga argument vid diskussioner om riskbedömningar och åtgärdsstrategier. Speciellt ger grundvattenmodellerna möjlighet till kvantifiering (beräkning av storleksordningar) av flöden, halter och kemikalietransport.

Genom att sätta upp en grundvattenmodell ”tvingas” modellören skapa en rimlig vattenbalans över området som ger storleksordningar på grundvattenbildning, -flöden, omfattning av in- och utströmningsområden mm som underlag för riskbedömningar. Det är grundläggande att bestämma strömningsriktningar och flödesstorlek för att bestämma eventuella miljörisker.

Modelleringsresultat kan vara värdefullt stöd både vid projektering av, och kontroll av efterbehandlingsåtgärder. Grundvattenmodellen kan även utnyttjas för simuleringar av framtida situationer, dvs. till att prediktera framtida förhållanden. Man måste dock vara mycket uppmärksam på att för att man skall kunna göra rimliga säkra prediktioner måste modellen vara mycket väl kalibrerad. Och ju längre fram i tiden som prediktionen gäller desto osäkrare blir de.

### *Möjliga nackdelar*

Det finns även några möjliga nackdelar. Dessa är framförallt att det kan vara lätt att tro alltför mycket på en modell. Utdata kan se mycket trovärdigt ut, och beräknade värden kan ha många decimaler även om modellen bygger på en mycket begränsad mängd underlagsdata och kanske inte är kalibrerad i egentlig mening. En sådan modell kan i och för sig vara mycket användbar, även om den inte är ”sann” men dess status måste tydligt anges (”varudeklaras”).

Det är även lätt att simuleringsresultat betraktas som ”absolut sanning” även om osäkerheter har försökt beskrivas. Inte minst är risken stor för detta om simuleringsresultat används som underlag i fortsatt arbete och beslutsfattande. I ett sådant fall kondenseras informationen, och mycket viktig bakgrundsinformation (som förutsättningar, osäkerheter, begränsningar mm) kan då riskera att filtreras bort.

### *Svårigheter*

Några svårigheter som många har pekat på är att få modellerna bra kalibrerade, samt att få modeller valideras i egentlig bemärkelse. För kalibrering finns datorbaserade hjälpmedel baserade på ”invers modellering”. En sådan programvara PEST (Parameter Estimation) har relativt stor spridning och finns bland annat som option till Visual Modflow. För att detta sätt att kalibrera en modell skall vara framgångs-



rikt krävs dock att de indata som används för kalibreringsproceduren är tillräckliga, och är lämpligt fördelade i tid och rum. Flera tillfrågades erfarenhet är att när man har begränsade indata går det väl så fort att utföra en manuell kalibrering, och den blir dessutom säkrare, eftersom en erfaren modellör kan lägga lämplig vikt på olika observerade data beroende var dessa finns och dessutom är mer ”adaptiv”. Det bör dock observeras att man även vid kalibrering m.h.a. invers modellering kan ange olika vikt (dvs. olika betydelse) för olika data.

Det största problemet vid kalibrering och validering synes snarast vara resursbrist i form av begränsad tid och budget.

Beträffande simulering av masstransport på ett realistiskt vis finns ett mer begränsat antal projekt där detta har genomförts. Detta gäller även transient simulering av flöden. För dessa fall är det tveksamt hur många resultat som kalibrerats trovärdigt för verkliga förhållanden.

Modellering av NAPL (dvs. föroreningar som ej förekommer löst i vattenfasen) finns mycket begränsad erfarenhet av bland de intervjuade. Denna typ av förorening kräver ett delvis nytt sätt att undersöka och simulera, vilket kräver ytterligare nya resurser. Detta gäller både modeller där förorening transporteras som en separat oljefas, och där avångning (övergång till gasfas) kan ske.

En svårighet av något annat slag är när förväntningar och resultat inte stämmer överens. Var ligger i så fall felet? Är den konceptuella modellen felaktig? Har det inte funnits möjlighet att revidera en felaktig modell? Var geologin mer komplex än vad som först antagits? Har uppdragstagare och / eller beställare missbedömt resursbehovet för att genomföra utredningen på ett kvalificerat sätt? Var grundvattenmodellering över huvud taget rätt verktyg vid utredning av aktuell frågeställning? Eller talar uppdragstagare och beställare inte samma språk? Situationer där förväntningar och resultat inte stämmer överens är på många sätt mycket frustrerande för alla inblandade parter, och kan även i olyckliga fall ge en vanligtvis bra metod dåligt rykte.

### *Övrigt*

Svaren visar på att modeller kan användas för de flesta typer av problemställningar. Det krävs en viss storlek på projekten för att man skall överväga att sätta upp en modell. Ju mer erfarna modellörer desto mer tycks man dock vara benägen att även snabbt sätta upp enkla modeller i mindre uppdrag.

#### **3.1.10 Erfarenhetsåterföring**

Som tidigare nämnts visar denna undersökning att grundvattenmodellering tycks vara en specialistkompetens, som behärskas av ett mindre antal experter på enmansföretag och av ett antal specialister på de större och de medelstora företagen. Vi bedömer att det i Sverige i dag finns mindre än 50 aktiva konsulter som regelbundet arbetar med grundvattenmodellering i uppdrag. Räknar vi bara de konsulter som regelbundet använder modeller för beräkning av föroreningsspridning blir antalet personer ännu mindre.

Vid frågan om på vilket sätt erfarenhetsåterföring sker i företagen blev svaret inte sällan ”inte alls”. Anledningen uppges vara att det tar tid att sätta in en medar-

betare i ett projekt och att det sällan finns ekonomi för utbildning i befintliga projekt. Det är säkrare att satsa på säkra kort, det vill säga använda den erfarna medarbetaren. Få av de företag vi har varit i kontakt med satsar systematiskt på att bygga upp kompetensen inom grundvattenmodellering. Försvinner nyckelpersonen från företaget, försvinner också kompetensen.

Flera av konsultföretagen har teknikorganisationer med syftet att fungera som ett forum för teknikutveckling och internutbildning. Vanligt är att personer med liknade utbildning och kompetens träffas under en eller ett par dagar för att diskutera sitt teknikområde. Flera företag har uppgett att grundvattenmodellering varit ett ämne som diskuterats i dessa sammanhang. Frågan är hur ofta det ges tid till praktiska övningar i modellering, vilket ju är enda sättet att bygga upp en varaktig kompetens.

Erfarenhetsutbyte mellan högskola och branschen tycks idag främst ske inom ramen för examensarbeten (och avhandlingar), samt genom att utexaminerade får arbete inom branschen.

### **3.1.11 Identifiering av brister i indata, kunskap och erfarenheter**

Det finns idag flertalet mycket sofistikerade verktyg för beskrivning och prediktering av ämnestransport i grundvatten men på grund av avsaknad av indata och/eller erfarenhet av användningen kan inte verktygens finesser nyttjas alternativt så blir osäkerheterna i beräkningarna stora. Brister i indata, kunskap och erfarenhet har identifierats genom inventeringsarbetet. Generellt kan sägas att bristen på indata, kunskap och erfarenhet är stor för masstransportmodellering medan situationen är betydligt bättre för hydrogeologisk modellering, även om det även för detta finns uppenbara brister. Nedan beskrivs de huvudsakliga brister i indata, kunskap och erfarenheter som identifierats.

#### *Identifierade brister i underlagsdata (indata)*

- Erfarenhetsvärden, inklusive förväntade intervall och fördelning för ansättande av parametrar, andra än hydrogeologiska, samt för vilka förutsättningar de gäller. t.ex. saknas lättillgänglig indata vad gäller nedbrytning, sorption etc. vid för olika pH:n, jordmåner etc. för svenska förhållanden. Vissa erfarenhetsvärden för hydrauliska egenskaper finns lättillgängligt redovisade, t.ex. Bengtsson (1996), Carlsson och Gustafsson (1984), Blomqvist och Tistad (1988) eller Knutsson och Morfeldt (1995).
- Beskrivning av heterogeniteter i geologiska formationer, speciellt viktigt i svensk geologi med mycket morän och sprickigt berg.

#### *Identifierade brister i kunskap och/eller erfarenhet*

- Erfarenheter och kunskap om betydelsen av och förmågan att simulera transienta förhållanden (dvs. förhållanden som varierar med tiden).
- Betydelsen av masstransportprocesser såsom sorption, diffusion, dispersion och andra kemiska och biologiska processer liksom möjligheten att simulera desamma.

- Erfarenheter av simulering av masstransportprocesser och hur de kan förväntas påverka transporten under olika förhållanden och vid variation av parametervärden.
- Interaktion mellan grundvatten och ytvatten, och vilken betydelse har det för transporten av föroreningar samt hur det skall beskrivas.
- Hantering av heterogeniteter (allmänt) samt dess påverkan på resultatet av simuleringen.
- Svensk handbok i grundvattenmodellering och masstransportmodellering.
- Smidiga verktyg alternativt standardiserad metodik/protokoll för kalibrering av modeller.
- Parameterisering av värden.
- Förståelse hos problemägare och myndigheter om vilka förväntade resultat som erhålls, inklusive mervärde liksom värde av de resultat som erhålls.
- Variation av konceptuell modell, randvillkor. Vad händer?

## 3.2 Syntes och kunskapsläge i Norden

### 3.2.1 Danmark

Generellt kan sägas att erfarenheten av grundvattenmodeller som verktyg för bedömning av föroreningsspridning är betydligt större i Danmark än i Sverige. Förklaringen till detta är sannolikt att grundvattnet har ett större skyddsvärde då det används för dricksvattenförsörjning i så gott som hela landet. Akvifererna är större och sammanhängande vilket gör att de är mer sårbara för föroreningsspridning. Det faktum att man på flera håll kunnat konstatera att grundvattnet är förorenat av pesticider, kväve och organiska lösningsmedel har ytterligare bidragit till att grundvattenkvalitet och grundvattenskydd fått en annan fokus än i Sverige. För närvarande läggs stora resurser ned på en nationell kartläggning av områden som är värdefulla för grundvattenuttag, ett arbete som kommer att ligga till grund för avgränsningar av skydds zoner för grundvatten (se t.ex. Thomsen et al, 2004).

Exempel på aktörer som använder och utvecklar modeller är universiteten i Köpenhamn och Århus, Danmarks Tekniska Universitet (DTU), Danmarks och Grönlands geologiska undersökning (GEUS) Geologiska Institutet, DHI samt olika konsultföretag. Uppskattningsvis finns det ett hundratal personer som i dag regelbundet använder modeller i uppdragsverksamhet. Vanligaste programvaran är liksom i Sverige GMS (Groundwater Modelling System), Groundwater Vistas samt Visual Modflow, men även DHIs programvara MIKE SHE är vanligt förekommande. Modeller som bygger på Finita Elementmetoden används sparsamt.

Många projekt där grundvattenmodeller används som verktyg inriktas i dag på studier av transport av diffusa föroreningar i form av t.ex. pesticider och kväve från jordbruksmark. Andra exempel på aktuella projekt är simulering av föroreningsspridning från Köpenhamns Metro, som har byggts genom tillrinningsområdet till en av stadens vattentäcker.

Den frekventa användningen av grundvattenmodeller har medfört att Miljöstyrelsen i Danmark har upprättat en handbok i ämnet; Retningslinier för opstilling af grundvandsmodeller (Miljøstyrelsen, 2001). I denna finns riktlinjer för hur modeller skall sättas upp på ett systematiskt och strukturerat sätt. Den behandlar även moment som kalibrering, validering och osäkerhetsanalyser. Riktlinjerna finns både för ren flödesmodellering och för modellering av föroreningstransport. Man påpekar dock att riktlinjerna främst kan appliceras på föroreningstransport i förhållandevis enkla system, där advektion är den dominerande transportprocessen. Fortfarande krävs utveckling av metodik för mer komplicerade system där olika biologiska och kemiska transportmekanismer dominerar.

### 3.2.2 Norge

I Norge används idag i hög utsträckning Visual Modflow för olika typer av grundvattenmodellering, men även andra programvaror som Processing Modflow och FEFLOW utnyttjas. I princip kan sägas att grundvattenmodellering inte användes i Norge annat än undantagsvis före det att flygplatsen Gardermoen planerades.

I samband med detta stora infrastrukturprojekt på en geologisk bildning som utgör en av Norges största grundvattenmagasin, startades ett omfattande forskningsprogram (det s.k. ”Faneprojektet”) om infiltration, olika renings- och fastläggningsprocesser i mark, och grundvattenströmning mm. Ett flertal universitetsinstitutioner och institut medverkade i detta program, och dessa utgör idag norska kompetenscentra.

Exempel på aktörer som använder modeller är Norges Geologiska Undersökning (NGU), Norges Vattendrags- och Energidirektorat (NVE), universiteten i Oslo och Trondheim (NTNU – Sintef), samt Universitetet för Miljö- och Biovetenskap (UMB, dvs. före detta Norges Lantbrukshögskola – NLH).

Beträffande användning inom konsultverksamhet av grundvattenmodeller vid förorenade områden ser bilden ungefär ut som i Sverige. Simulering av föroreningstransport som inkluderar beräkning av fastläggning och nedbrytning sker tämligen sällan.

### 3.2.3 Finland

I Finland används och utvecklas modeller av aktörer som GTK (Finsk geologisk undersökning), SYKE (Finnish Environmental Institute), på universitet och tekniska högskolor samt av konsulter. Projekten är ofta storskaliga och knutna till forskning, t.ex. vid beräkning av transport av pesticider, samt inom NAPL-forskning. Andra exempel där spridningsmodeller upprättats är för beräkning av salttransport från vägar, inom skogsindustrin samt för beräkning av transport av svampbekämpningsmedel. Även klorfenoler och dioxiner har modellerats även om det är sällan förekommande (Saukkonen, 2002).

Det vanligaste programvarorna är GMS (Groundwater Modelling System), men andra program förekommer såsom T2VOC, RISC 4.0 samt olika typer av egenutvecklade program.

Modeller för föroreningspridning används fortfarande relativt sparsamt och anledningen till detta är flera. Liksom i Sverige karaktäriseras Finland av hetero-

gena jordlager och sprickiga berg, förhållanden som inte alltid lämpar sig för upprättande av modeller. Insamling av indata är tidskrävande och kostnaderna för insamlingen av indata uppvägs inte alltid av de resultat som modellen genererar. Ett annat problem är att kompetensen i dag är starkt knuten till den akademiska världen och ännu inte spritt sig brett till konsultföretag som jobbar med föroreningsproblematik. Generell kompetens om modeller saknas också hos myndigheter, vilket gör att man där har svårt att ta till sig och utvärdera resultaten på ett riktigt sätt.

För att modellering skall få en bredare förankring efterfrågas rutiner för hur data skall insamlas samt en utveckling av enkla och användarvänliga program. Kunskapen och möjlighet till utbildning finns, men brist på projekt gör att den praktiska erfarenheten fortfarande är begränsad. Kompetensen och expertkunskaper kan endast ökas genom att man vågar använda modeller i fler projekt.

## 3.3 Arbeten med grundvattenmodeller

När det gäller själva modelleringsprocessen (och valmöjligheter/beslutspunkter i denna process) finns ett antal bra flödesscheman uppställda, se exempelvis Andersson & Woessner (1992), ASTM (1993) eller Naturvårdsverket (1997). Denna senare rapport ger även många goda råd beträffande uppställning av grundvattenmodeller, och rapportering av erhållna resultat.

**Tabell 1. Exempel på innehållsförteckning i en modelleringsrapport (modifierad från Naturvårdsverket, 1997)**

<b>1</b>	<b>Inledning</b>
1.1	Bakgrund
1.2	Platsbeskrivning
1.3	Problemformulering, omfattning och syfte
<b>2</b>	<b>Konceptuell modell</b>
2.1	Grundvattenförhållanden
2.2	Hydrologiska gränser
2.3	Hydrauliska egenskaper
2.4	Källor och sänkor
2.5	Vattenbalans
2.6	Vattenkemi
2.7	Föroreningskälla eller - källor
<b>3</b>	<b>Programkod</b>
3.1	Programval
3.2	Programbeskrivning
<b>4</b>	<b>Konstruktion av modellen</b>
4.1	Antaganden, förenklingar och parameterisering
4.2	Modelldiskretisering
4.3	Hydrauliska egenskaper
4.4	Randvillkor
4.5	Transport-, fastläggnings- och nedbrytningsparametrar
4.6	Kalibreringsobjekt och mål
<b>5</b>	<b>Kalibrering och validering</b>
5.1	Känslighetsanalys
5.2	Validering av modellen
<b>6</b>	<b>Prediktiva simuleringar</b>
6.1	Redovisning av specifika förutsättningar vid enskilt simulerat fall
6.2	Redovisning av resultat från enskilt simulerat fall
<b>7</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>
7.1	Modellantaganden och begränsningar
7.2	Beskrivning och värdering av osäkerheter
7.3	Modellprediktioner
7.4	Rekommendationer
<b>8</b>	<b>Referenser</b>
	<b>Bilagor (utvalda in- och utdata mm)</b>

Vi vill här trycka på vad vi anser vara viktiga steg och frågor vid en modellering av föroreningstransport i grundvatten. Det är viktigt att poängtera att man vare sig kan, bör eller skall låsa upp all grundvattenmodellering enligt ett enda standardut-

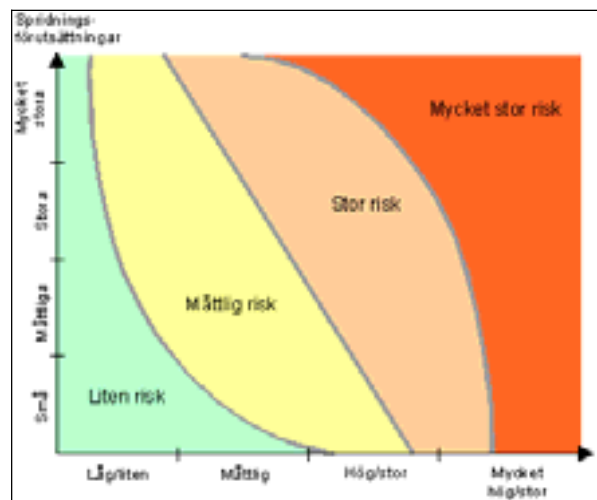
förande. Förutom att geologin och hydrogeologin varierar från objekt till objekt, så varierar även syftet och ekonomin mellan olika projekt. Detta gör att ambitionsnivån måste kunna variera mellan projekt, men det är viktigt att beställare och utomstående granskare snabbt och enkelt skall kunna uppfatta ambitionsnivån hos en genomförd modellering och också kunna skaffa sig en uppfattning om hur pass säker eller osäker modelleringen är.

Allmänt vid ett objekt med markförorening bör man ställa sig följande frågor:

- Kan föroreningen sprida sig med grundvattnet?
- Riskeras en skyddsvärd recipient påverkas (yt-/grundvatten)?
- Kan frågeställningen lösas m h a en grundvattenmodell? I så fall, vilka svar vill vi ha och kan vi få?
  - Generellt:
    - Storleksordningar eller mer exakt.
    - Underskridande gränsvärde.
    - Prediktiv modell.
    - Scenarion vid olika efterbehandlingsåtgärder, t.ex. geologiska barriärer, täckning eller hydraulisk avledning.
  - Endast flödesmodell/hydraulisk modell?
    - Flödesmängder
    - Spridningsvägar
    - Utspädning
  - Masstransportmodell – vilka processer kan och skall inkluderas?
    - Diffusion/dispersion
    - Sorption
    - Kemiska reaktioner
    - Nedbrytning
    - Avångning
- Hur skall frågeställningen lösas m h a modellen?

Vid beskrivning av utförd modellering är det viktigt att det framgår hur man har kommit fram till (och valt) randvillkor, hydrauliska egenskaper hos akvifären, effektiv porositet etc. Vilka förenklingar och generaliseringar har gjorts?

Låt oss betrakta ett förorenat område skall undersökas för en eventuell efterbehandling. I samband med en miljöriskbedömning skall hänsyn tas till spridning samt mängd och farlighet av föroreningen. Detta görs genom en sammanvägning av de ovan nämnda faktorerna. Vid denna sammanvägning kan ett schema av nedan angivna typ användas för att göra informationen mer överskådlig (Naturvårdsverket, 1999a).



Figur 1. Schema för samlad riskbedömning (Naturvårdsverket, 1999a). På x-axeln anges föroreningarnas farlighet, föroreningsnivå respektive känslighet/skyddsvärde.

### 3.3.1 Exempel på arbetsätt

Den metodik som väljs beror av ambitionsnivå och på bedömning av ”vad räcker för att lösa uppgiften?” De olika typer av metodik som exemplifieras i det följande är:

- Worst-case scenario.
- Kombination av flödesmodell och analytisk beräkning för masstransport.
- Scenarioanalys (av olika scenarier för t.ex. olika typer av efterbehandling).
- Riskmodell - bedömning av influensområden för brunnar och strömningsvägar.
- Prediktiv modell inklusive olika processer (som dispersion, fastläggning och nedbrytning).

#### *Worst-case scenario (exempel SGU, f.d. Statens Oljelager)*

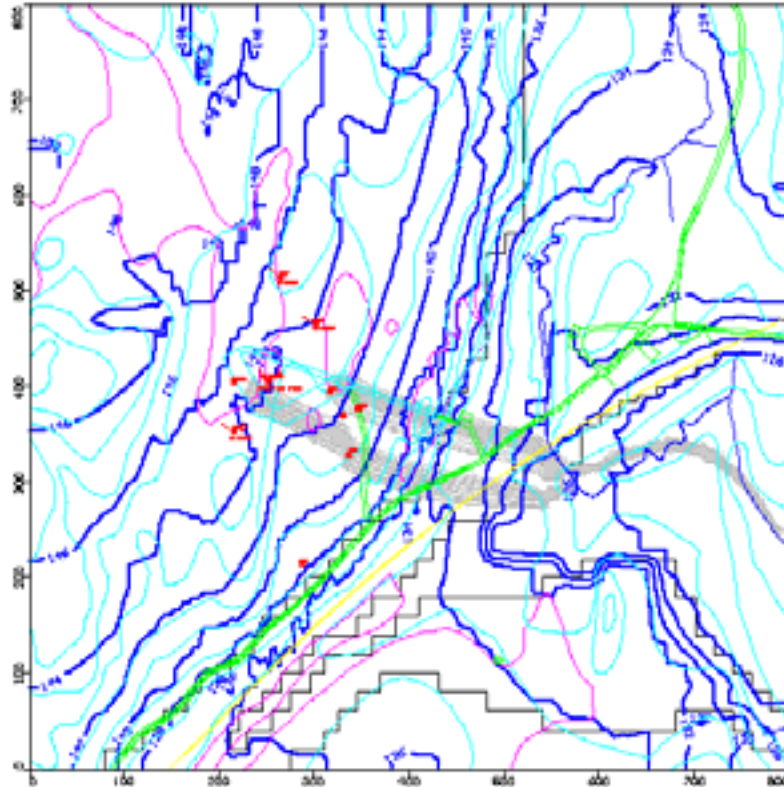
Vid ett ”Worst-case scenario” görs en bedömning av vad som skulle kunna vara det värsta tänkbara fallet. Oftast väljer modellören indata, begynnelse- och randvillkor från de förhållanden och parametrar som är kända. Resultatet från simuleringen beror i stor grad på modellörens erfarenhet och bedömning. Denna typ av simulering kan ses som en kvantifiering och/eller illustration av en erfaren hydrogeologs uppfattning.

Sällan finns det sannolikhetsfördelningar för parametrarna som beskriver de viktigaste processerna. Om så vore fallet skulle det vara möjligt att välja parametrar med en definierad sannolikhet. Detta skulle ge en mer specificerad sannolikhet för simulerat fall.

Om simuleringsverktyget möjliggör en mer avancerad statistisk beräkning skulle det vara möjligt att (med sannolikhetsfördelningar för de viktigaste parametrarna) göra exempelvis Monte Carlo-analys där parametervärden slumpas fram för samtliga sinsemellan oberoende parametrar. Det bör dock poängteras att det krävs



mycket omfattande fältarbete (eller databas) för att kunna skapa goda sannolikhetsfördelningar av aktuella parametrar.



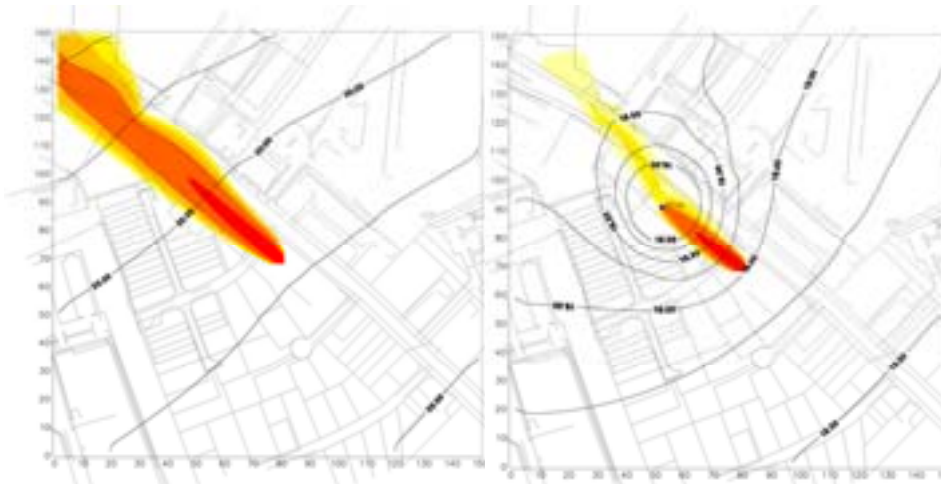
Figur 2. Flödesmodell + koncentration i källan – ingen hänsyn tagen till sorption eller nedbrytning

#### *Kombination av flödesmodell och analytisk beräkning för masstransport*

Denna typ av modellering går ut på att en flödesmodell upprättas m h a en grundvattenmodell varvid flödesmängder, utspädning, spridningsvägar, etc. beräknas. Med detta underlag som bas beräknas sedan transporten och spridningen analytiskt med konventionella transportekvationer (Persson, 2004).

#### *Scenarioanalys för t.ex. olika efterbehandling (exempel deponi med olika täckning, konstgjorda geologiska barriärer eller "pump and treat"-försök)*

Denna typ av simuleringar visar på "vad händer om ifall...". Simuleringarna kan ge tämligen säkra prognoser om akvifärens uppbyggnad och hydrauliska egenskaper, samt parametrar för föroreningens fastläggning och eller nedbrytning är kända. Akvifärens egenskaper brukar vara tämligen väl undersökta om det rör sig om vattentäkt, men betydligt sämre kända vid förorenade områden i allmänhet.



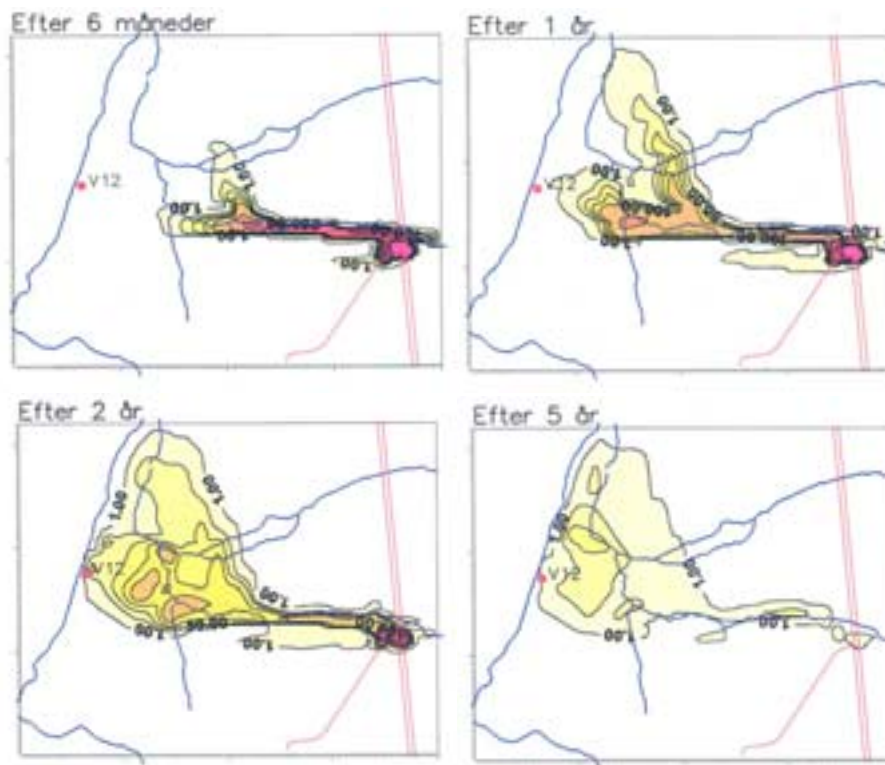
Figur 3. Figuren visar en simulerad förorenings-spridning. Modellen skall här användas till att värdera en optimal utformning av saneringspumpning (Ramböll, 2004).

#### *Riskmodell för vattenförsörjning, inströmningsområden till olika vattentäkter*

Denna typ av simuleringar kan ge relativt säkra prognoser eftersom enbart hydrauliska aspekter (influensområden och strömningsvägar) inkluderas. Vid analys om förorening inom det hydrauliska influensområdet kan nå en enskild brunn blir prognosen vanligen betydligt mindre säker. En simulering av detta slag där MODPATH nyttjades har utförts i Kristianstads kommun, (2000).

#### *Prediktiv modell inklusive dispersion och nedbrytning – Hallandsås*

Vid dessa simuleringar (se figur 4) utfördes simuleringar där en flödesmodell modifierades något och kompletterades med parametrar för dispersion och nedbrytning. Dessa fick väljas från litteratur och modelleringserfarenhet, men simuleringarna indikerade att risken för att halter av akrylamid över acceptabelt gränsvärde skulle förekomma i den kommunala dricksvattenbrunnen V12 nedströms var liten. Simuleringsresultaten låg som grund för borring av kontrollbrunnar mellan föroreningskällan och den kommunala brunnen.



Figur 4. Figuren visar en simulering av föroreningstransport av akrylamid (från mellanpåsaget vid Hallandsåstunneln) som inkluderar dispersion och nedbrytning (MGG 1998).

I bilaga 3 finns ett förslag på ”Checklista för utförare och beställare” för att sammanfatta information om modelluppbyggnad och indata, samt osäkerheter vid olika uppdrag som även omfattar grundvattenmodellering.

## 4 Slutsatser

*Aktörer:* Många aktörer använder grundvattenmodeller vid projekt med förorenad mark – men oftast på ett kraftigt förenklat sätt. Det är vanligt att använda enbart flödesmodell, samt partikelspårning. Större modelleringskompetens och – erfarenhet är begränsad till ett fåtal personer

*Objekt och problemställningar:* Det synes som om man i branschen anser att grundvattenmodeller kan tillämpas vid alla typer av objekt, riskbedömning och föroreningstransport i grundvatten.

*Programkod:* Den vanligaste programkoden för flödesberäkningar är MODFLOW som bygger på finit differensmetod. För partikelspårning används Modpath. Bägge dessa program ingår i programpaketet GMS, Visual Modflow och Groundwater Vistas. Visual Modflow och GMS kan närmast anses vara branschstandard i Sverige idag. Det är tveksamt om programpaketet Groundwater Vistas (som är mycket använt i Storbritannien) över huvud taget används i Sverige. Specialprogram finns och används framför allt inom FoU-sektorn.

*Komplexitet:* Masstransportmodeller körs princip bara i FoU-projekt och för hypotetiska scenarion (där man inte behöver eller kan kalibrera). Man tvingas ofta på grund av begränsad tid eller budget bortse från heterogeniteter, och hantera dessa på ett förenklat sätt.

*Indata, kvalitet och tillgång:* Det är sällan som det finns eller kan tas fram goda indata för transportmodellering annat än vid mycket speciella förhållanden och forskningsprojekt.

*Behandling av osäkerheter;* sker sällan efter protokoll, eller genom Monte Carlo analys. Vanligen hanteras osäkerheter genom en förenklad känslighetsanalys, dvs. ett antal parametrar ändras utifrån erfarenhet varefter resultatet studeras. Olika konceptuella modeller prövas sällan. Validering görs sällan.

*Användning:* Transport- och spridningsmodeller används regelbundet bara i större projekt där grundvatten är skyddsvärt. Sveriges geologi med tämligen små avrinningsområden och akvifärer, samt bristen på användning av grundvatten är en orsak till att modeller inte används mer. Svårigheter att kommunicera mervärden med uppdragsgivare etc. minskar även användning. Om konsulten inte kan visa på en tydlig möjlighet till besparingar vid tänkt sanering upplevs utredningsarbete (och då kanske speciellt grundvattenmodellering) bara som kostnader. I många fall finns en brist på kompetens beträffande modellering hos både den konsult som säljer in olika utredningar och hos beställaren.

*Mervärden:* Grundvattenmodeller innebär att man kan pröva hypoteser och kontrollera att man har fått med sig all nödvändig information. Man tvingas bland annat att göra en **vattenbalans**. Övriga simuleringsresultat kan visa på förhållande som har blivit förbisedda i utredningsarbetet (eller brister i underlagsmaterial), som man annars inte hade fått fram. Modeller och simuleringsresultat kan vara mycket pedagogiska att visa upp för beställare och myndigheter, och underlätta kommunikation av förhållanden och förväntade resultat.

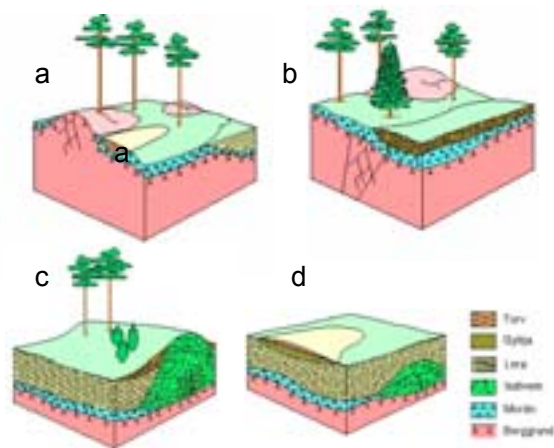
*Nackdelar:* Simuleringsresultat ses lätt som absolut ”sanning”. Kan se väldigt bra ut. Resultatet kan se bra ut oavsett om modellen är kalibrerad eller inte, vilket i värsta fall kan leda till att man drar långtgående slutsatser på undermåligt underlag. Modellering och införskaffande av nödvändigt underlagsmaterial kan upplevas som resurskrävande!

*Svårigheter.* Många uttrycker synpunkter att det är svårt att på ett effektivt och snabbt, systematiskt sätt kalibrera modeller. Metodik saknas. Detta gäller särskilt beträffande masstransport (annat än för hypotetiska fall). Erfarenhetsvärden för masstransportparametrar saknas idag i praktisk verksamhet.

*Indata och kunskap som saknas:* Erfarenhetsvärde på de olika parametrar som behövs vid masstransportmodellering efterfrågas av många som vi varit i kontakt med. Även kunskaper om processerna (dvs. vad som styr vad) efterfrågas.

## 5 Rekommendationer

- Det finns ett stort behov av erfarenhetsspridning och -återföring beträffande grundvattenmodellering i allmänhet och transportmodellering i synnerhet. Detta kan genomföras på olika sätt, exempelvis i form av handböcker, genom kursverksamhet och internt i företag. Kurser skulle kunna anordnas av exempelvis Naturvårdsverket, SGF eller universitet och högskolor. Det kan påpekas att även programvaruleverantörerna anordnar kurser.
- Ett möjligt sätt att sprida kunskaper som idag finns lokalt på universitet och högskolor kan vara att initiera demonstrationsobjekt (jämför Miljöstyrelsen, 2004a, b). Detta kan vara objekt där det redan utförts omfattande forskning, och där saneringsåtgärder följs upp i ett lämpligt kontrollprogram. För dessa objekt kan det vara tillräckligt att sammanställa och tillgängliggöra befintligt material i form av Naturvårdsverksrapport (eller SGF-rapport).
- Det kan vara lämpligt att ta fram protokoll för kalibrering av modell. Ett sådant protokoll skall utgöra stöd för en systematisk och så långt möjligt likformig metodik. Protokollet skall innehålla information om vad man behöver för typ av information i relation till olika osäkerheter.
- Det vore önskvärt om det fanns en handbok beträffande masstransportmodellering på svenska som även innefattar erfarenheter från ”svensk” geologi, men även en motsvarande handbok beträffande grundvattenmodellering (flödesmodellering).
- Det finns sedan tidigare framtaget ett förslag till innehållsförteckning som anger vad en modelleringsrapport bör innehålla (Naturvårdsverket, 1997). Formulär för standardiserad **sammanfattning** av projekt bör dock tas fram. Ett sådant kan användas som checklista för både utförare och beställare, och för snabb jämförelse mellan olika utförda flödes- och transportsimuleringar.
- Det vore önskvärt att jämföra kommersiellt tillgängliga 3D finita differens modeller med likaledes kommersiellt tillgängliga 3D finita element modeller. Dessa senare borde lämpa sig bättre för flertalet av våra vanligaste geologiska miljöer och lagerförhållanden. Exempel är sprickigt urberg, rullstensåsar och moränbackar (Figur 5). För jämförelse kan det vara lämpligt att först validera äldre simuleringar som gjorts med finit differensmodell, och därefter simulera samma konceptuella modell med finit elementmodell.



Figur 5. Hydrogeologiska typområden i Sverige: a) kristallin bergrund, b) morän och svallsediment, c) isälvsavlagringar och d) slutna akvifär, sedimentär bergrund visas ej här (efter Naturvårdsverket, 1999b).

- Det är viktigt att lära sig och använda befintliga modeller innan nya utvecklas. Det synes inte nödvändigt att utveckla generell programkod i Sverige för de vanliga tillämpningarna i branschen.
- Det vore önskvärt att samla erfarenhetsvärden för masstransportegenskaper och heterogeniteter, och göra dessa tillgängliga. Speciellt intressant om en sådan sammanställning kunde innehålla fördelningar, väntevärden och intervall. Jämför exempelvis sammanställningar av hydraulisk konduktivitet (K-värden) för olika jordarter som finns bland annat i handboken Bygg .
- Ta fram information till (och kurser speciellt för) beställare beträffande ”Vad är grundvattenmodeller och vad kan de användas till”? Skriftlig informationen skulle kunna vara i form av broschyr som även kan läggas upp på Internet.

## 6 Referenser

- Anderson, M. and Woessner, W., 1992: *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*, Academic Press Inc., New York, USA.
- ASTM, 1993: *Standard guide for application of a ground-water flow model to a site-specific problem*, ASTM D 5447-93, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA
- Badiner, C., Peña Duarte, M.A., 2001: *LNAPL Remediation by soil vapour extraction – Performance assessment by numerical simulation*, Mark och Vattenteknik, KTH, Examensarbete, 2001
- Bengtsson, M-L., 1996: *Hydrogeologisk sårbarhetsklassificering som verktyg i kommunal planering*, Med exemplifiering i Lerums kommun, Licentiatuppsats, Chalmers Tekniska Högskola, Publ. A 81
- Blomqvist, T., Tistad, L., 1998: *Förorening av vattentäkt vid vägtrafikolycka - Hantering av risker vid petroleumutsläpp*. Borlänge, Sverige, Vägverket och Räddningsverket
- Carlsson, L., Gustafsson, G., 1984: *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*, Byggforskningsrådet, Rapport R41:1984
- Crawford, J., 1999: *Geochemical Modelling – A review of Current Capabilities and Future Directions*, Naturvårdsverket, SNV Report 262
- Ekman, C., 2004: *Föroreningstransport i grundvatten – En modelljämförelse, Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik*, Uppsala Universitet, Examensarbete UPTEC W04 022
- Knutsson, G, Morfeldt, C-M., 1995: *Grundvatten, Teori och Tillämpning*
- Kristianstads kommun, 2000: *Kristianstads Vattenförsörjning, Förutsättningar – Möjligheter - Konsekvenser*
- Liedholm, M., Larsson, K., Bengtsson, M-L., Blom, J., Wodlin, J., Rhén, I., Forsmark, T., 2000: *Projekt Kvarntorp, Grundvattenmodellering av Kvarntorpsområdet med MIKE SHE*
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W., 1984: *A modular tree-dimensional finite-difference ground-water flow model*: U. S. Geological Survey Open-File Report 83-875, 528 p.
- MGG, Miljögranskningsgruppen, 1998. MGG PM 104. *Lokal Model Mellanpåslag. Modellering af Forureningsspredning*
- Miljøstyrelsen, 2001: *Retningslinier for opstilling af grundvandsmodeller*, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 17



- Miljøstyrelsen, 2002: *Vurdering af concentration og varighed af BAM-forurening I Grundvand*, Delrapport 4, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 36
- Miljøstyrelsen, 2004a: *Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening 2004* Orientering fra Miljøstyrelsen Nr. 3
- Miljøstyrelsen, Danish Environmental Protection Agency, 2004b: *Calibration of Models Describing Pesticide Fate and Transport in Lillebaek and Odder Baek Catchments*, Pesticide Research Nr. 62
- Naturvårdsverket, 1997: *Modeller för miljögeotekniska tillämpningar*, En rapport från en arbetsgrupp tillsatt av miljögeotekniska kommittén inom Svenska Geotekniska Föreningen, Efterbehandling och Sanering, Rapport 4836b.
- Naturvårdsverket, 1999a: *Metodik för inventering av förorenade områden, Bedömningsgrunder för miljö kvalitet*, Vägledning för insamling av underlagsdata, Rapport 4918
- Naturvårdsverket, 1999b: *Bedömningsgrunder för miljö kvalitet, Grundvatten*, Rapport 4915
- Norrman J, 2004: *On Bayesian Decision Analysis for Evaluating Alternative Actions at Contaminated Sites*, Department of GeoEngineering, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. Doktorsavhandling. Ny serie nr 2202.
- Persson, K., 2004: *Modellering av föroreningstransport i grundvattnet från området kring Componenta's gjuteri i Alvesta till Lekarydsån*, Mark och Vattenteknik, KTH, Examensarbete, 2004
- Ramböll Danmark, 2004. *Modellering af afvaergepumpning i Gladsaxe Kommune*.
- Saukkonen, K., 2002: *Modelling transport of chlorinated phenols, dioxins and furans in the landfill area contaminated with sawmill soil*, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, M.Sc. thesis
- SGU, Sveriges Geologiska Undersökning, 2002: *Grundvatten 1/2002*
- Sokrut, N., 2004: *The Integrated Distributed Hydrological Model ECOFLOW – a Tool for Catchment Management*, Department of Land and Water Resources Engineering, KTH, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden. 2004
- Thomsen, R., Søndergaard, V.H., Sørensen, K.I., 2004: *Hydrogeological mapping as a basis for establishing site-specific groundwater protection zones in Denmark*, Hydrogeology Journal 12:550-562
- Wall, H., Andersson, J., 1999: *Skattning av en akvifers hydrauliska egenskaper med stokastisk FEM*, Med exempel från Malmöområdet, Avd för Byggnadsmekanik och Avd för teknisk geologi, Lunds Universitet, Examensarbete

# Bilaga 1

## Enkät

**Bilaga 1**  
Sida 1 av 6

**Enkät rörande användning av numeriska grundvattenmodeller för bedömning av spridning av föroreningar från förorenade områden**

1. Används inom ert företag/organisation numeriska grundvattenmodeller som stöd vid bedömning av transport av föroreningar i grundvatten från förorenade områden (om nej på denna fråga, gå till fråga 15)?

JA       NEJ

2. Antal projekt där grundvattenmodeller upprättats den senaste fem-årsperioden?

1-5

5-10

>10  \_\_\_\_\_

3. På vilken typ av föroreningskälla har grundvattenmodellen använts?

Förorenat område <sup>1)</sup>	<input type="checkbox"/>	Grundvattenskydd	<input type="checkbox"/>
Gruvfältsdeponi	<input type="checkbox"/>	Övrigt	<input type="checkbox"/> _____
Deponi, övrig	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Infrastrukturprojekt	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>

1) Ett förorenat område är ett område, en deponi, mark, grundvatten eller sediment som är så förorenat att föroreningshalten påtagligt överskrider lokal/regional bakgrundhalt. Det är ett område som är förorenat av en eller flera lokala punktkällor (SNV 1999).

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

© Miljöförvaltningen i Stockholm 2014. Rapporten publicerades första gången 2014 och uppdaterades 2016.

4. Vad var syftet med att upprätta modellen/vilka problem hoppades man lösa genom att upprätta modellen?

Riskbedömning ytvattenrecipient	<input type="checkbox"/>	Fastställande hydraulik, flödesmängder	<input type="checkbox"/>
Riskbedömning grundvattenrecipient	<input type="checkbox"/>	Övrigt	<input type="checkbox"/>
Effekter av efterbehandlingsåtgärder	<input type="checkbox"/>		
Fastställande av spridningsvägar	<input type="checkbox"/>		

5. Vilken programvara och vilka moduler har använts?

VISUAL MODFLOW	<input type="checkbox"/>	Annan modell	<input type="checkbox"/>
Groundwater VISTA	<input type="checkbox"/>		
GMS	<input type="checkbox"/>		
MOKE SHE	<input type="checkbox"/>		
SEEP	<input type="checkbox"/>		

6. Om svaret ovan är "annan modell", vilken beräkningsalgoritm har använts?

Finit Element metod	<input type="checkbox"/>
Finit Different metod	<input type="checkbox"/>

7. Har grundvattenflödesmodellen kombinerats med partikelspårning eller med en masstransportmodell?

- Endast flödesmodell   
Partikelspårning (particle tracking)   
Masstransportmodell

---

---

---

8. Om masstransportmodell upprättats, vilka transportmekanismer har tagits med i modellen?

- Fästläggning  Avläggnig   
Nedbrytning   
Diffusion/dispersion

---

---

---

9. Hur har osäkerheter hanterats?

- Känslighetsanalys  Inte alls   
Monte Carlo-analyser   
Beskrivs i text   
Annan metodik

---

---

---

10. Hur bedömer du generellt hanteringen av osäkerheter? Är det en skillnad mellan olika typer av projekt?

Bra	<input type="checkbox"/>
Ganska bra	<input type="checkbox"/>
Dålig	<input type="checkbox"/>

---

---

---

11. Hur bedömer du tillgången till indata?

	Bra	Måttig	Dålig
Topografi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geologi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundvattennivåer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundvattenkemi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grundvattenflöden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Akiferens hydrauliska egenskaper	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konc. föroreningskälla	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Spridnings- och fastläggningssegenskaper	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Utfördes validering?

JA  NEJ

13. Om så, hur? Om inte, varför?

---

---

---

14. Gav modellen ett resultat som du inte hade väntat dig?

15. Vad är anledningen till att ni inte använder grundvattenmodeller i dessa sammanhang?

JÄ

NEJ

Ej nödvändigt för att  
lösa problemet

För  
resurskrävande  
/för dyrt för  
kunden

Riskobjekt saknas  
(ytvatten, grundvatten-  
recipient)

Annan orsak

Olämpliga  
geologiska  
förhållanden

Kompetens/  
mjukvara saknas

---

---

---

Övriga frågor att diskutera vid intervjuerna:

16. Vad anser du är huvudsakliga anledningen till att grundvattenmodeller används i ert företag/organisation?

---

---

---

17. Hur sker erfarenhetsöverföring gällande grundvattenmodeller inom ert företag/organisation?

---

---

---

18. Vilka typer av projekt rörande förorenade områden anser du lämpar sig bäst för användning av grundvattenmodeller?

---

---

---

19. Vilka mervärden anser du att grundvattenmodeller ger för att bedöma spridning från förorenade områden?

---

---

---

20. Vilka anser du är de främsta nackdelarna med grundvattenmodeller i dessa sammanhang?

---

---

---

21. Är grundvattenmodeller ett relevant verktyg?

- När ska de användas?
- Vilken detaljeringsgrad/omfattning?
- Vilken "nivå" skall branschen lägga sig på?

---

---

---

22. Vilka indata och/eller kunskap saknas idag för att (bättre) kunna använda befintliga modeller för att beräkna masstransport av föroreningar i grundvatten?

A) Indata:

---

---

---

B) Kunskap:

---

---

---

23. Övriga kommentarer

---

---

---

# Bilaga 2

## Kontaktade aktörer

### **Företag/organisation**

Artesia Grundvattenteknik  
Banverket, Östra Banregionen  
Banverket, Mellersta Banregionen  
Bergab  
Citytunnelprojektet  
Chalmers tekniska högskola  
DHI Sverige  
Ecoloop  
Geologic i Göteborg AB  
Golder Associates  
JM  
Johan Helldén AB  
Jordforsk (Norge)  
Kemakta AB  
Institutionen för mark och vatten, KTH  
Institutionen för kemiteknik, KTH  
Länsstyrelsen i Skåne län  
Länsstyrelsen Kalmar län  
Länsstyrelsen i Stockholms län  
Länsstyrelsen Västra Götaland  
Ramböll Sverige AB  
Ramböll Danmark AS  
Ramböll Finland OY  
Ramböll Norge AS  
Statens Geotekniska Institut (SGI)  
SF Geologic AB  
Svensk Geoteknisk Förening (SGF)  
Sveriges Geologiska Undersökning (SGU)  
SKB  
C4 Teknik, Kristianstad  
Stockholm Vatten  
SWECO Viak  
WSP Environmental  
Vägverket Produktion



# Bilaga 3

## Grundvattenmodellering: Checklista för utförare och beställare

**Modellering - Checklista:**

Uppdragsnummer: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_  
 Uppdragsgivare: \_\_\_\_\_  
 Område: \_\_\_\_\_  
 Koordinatsystem: \_\_\_\_\_

**INDATA:**

Områdesavgränsning: Kartblad: Topografiska \_\_\_\_\_  
 Ekonomiska \_\_\_\_\_

Koord.: Väst \_\_\_\_\_  
 Öst \_\_\_\_\_  
 Syd \_\_\_\_\_  
 Nord \_\_\_\_\_

Information om	"Källa"	Tillgängligt:					
		På papper	Koord- system	Digitalt (filnamn)	Koord- system	Tids- upplös.	Rumslig upplös.
Topografi							
Vattindelare							
Nederbörd							
Åvunstrning							
Geologi	Jord/sediment: Berg: Strukturgeologi:						
Grundvattennivåer							
Havsnivåvariationer							
Markanvändning							
Konstruktioner							

Indatakvalitet (bedömd): \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**KONCEPTUELL MODELL:** Beskrivning klar: \_\_\_\_\_  
 Beskrivning godkänd av beställare / beställarens ombud: \_\_\_\_\_

<b>Modellering - Checklista</b>	
Uppdragsnummer:	_____
Uppdragsgivare:	_____
Område / modellnamn:	_____
<b>NUMERISK MODELL:</b>	
Namn:	_____
Version:	_____
Modellavgränsning:	Koord.: Väst _____ Ost _____ Syd _____ Nord _____
Modelleringsarbete påbörjat:	_____
<b>MODELLSTRUKTUR:</b>	
Antal rader:	_____
Antal kolumner:	_____
Antal lager:	_____
=> Antal celler:	_____
Rand- och begynnelsevillkor:	_____
Antal egenskapsområden:	_____
<b>MODELLKALIBRERING:</b>	
Utförd:	_____
Kalibreringsmetod:	_____
Kalibrering utförd mot följande data:	_____
Resultat redovisas som:	_____
<b>SIMULERINGAR (Prediktion):</b>	
Simuleringar sparade på enhet / i bibliotek:	_____
Kommentarer:	_____ _____ _____
<b>VALIDERING:</b>	
Utförd?	_____
Om utförd, i så fall mot vilka data?	_____
<b>GRANSKNING:</b>	
Modelleringsresultatet granskat (datum):	_____
Modelleringsresultatet granskat av:	_____
Kommentarer:	_____ _____ _____

# Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 1

RAPPORT 5541

NATURVÅRDSVERKET  
ISBN 91-620-5541-0  
ISSN 0282-7298

## Förstudie - Användning av numeriska beräkningsmodeller för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten

Rapporten behandlar användningen av numeriska grundvattenmodeller i Sverige för beskrivning av transport och spridning av föroreningar i grundvatten. Arbetet har utförts i form av ett inventeringsarbete där ett antal aktörer i branschen och den vetenskapliga världen med kunskap om grundvattenmodellering och föroreningstransport har kontaktats och intervjuats. En sammanställning av status- och kunskapsläget presenteras och baserat på denna ges ett förslag på metodik för hur numeriska beräkningsmodeller kan användas i samband med utredningar av förorenad mark. Vidare föreslås riktlinjer för fortsatt arbete och metodutveckling.

Naturvårdsverket har inte tagit ställning till innehållet i den här rapporten. Författarna svarar själva för innehållet, slutsatser och eventuella rekommendationer.

**Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering** samlar in, bygger upp och sprider kunskap om förorenade mark- och vattenområden. Genom Hållbar Sanering kan myndigheter, forskare och företag söka bidrag för utredningar, seminarier och utvecklingsprojekt som täcker kunskapsluckor på kort och lång sikt. Hållbar Sanering styrs av en programkommitté som består av representanter från Banverket, Göteborgs stad, KTH, Linköpings Universitet, Länsstyrelsen i Kalmar, Naturvårdsverket, Norges Teknisk- Naturvetenskapliga Universitet; SGI, SLU, Sydkraft SAKAB och Umeå Universitet.