



VARIA 560:3



## Föroreningsspredning

Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga  
naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat

Deluppdrag 3

Gunnel Nilsson, Håkan Rosqvist, Yvonne Andersson-Sköld,  
Peter Starzec, Jenny Norrman

|                   |                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Varia</b>      | Statens geotekniska institut (SGI)<br>581 93 Linköping                                                                                                                                              |
| Beställning       | SGI<br>Litteraturtjänsten<br>Tel: 013-20 18 04<br>Fax: 013-20 19 09<br>E-post: <a href="mailto:info@swedgeo.se">info@swedgeo.se</a><br>Internet: <a href="http://www.swedgeo.se">www.swedgeo.se</a> |
| ISSN              | 1100-6692                                                                                                                                                                                           |
| ISRN              | SGI-VARIA--04/543--SE                                                                                                                                                                               |
| Projektnummer SGI | 12393                                                                                                                                                                                               |
| Dnr SGI           | I-0502-0100                                                                                                                                                                                         |
| Foto omslag       | SGI                                                                                                                                                                                                 |

**FÖRORD**

Regeringen har i regleringsbrevet för år 2005 (M2004/4162/A) gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att redovisa en handlingsplan för institutets arbete de närmaste åren med att förutse och verka förebyggande för att förhindra ökad risk för ras och skred med anledning av prognoser för ett förändrat klimat. Uppdraget är begränsat till att innefatta naturolyckor, det vill säga ras, skred, erosion, översvämning och tillhörande miljökonsekvenser. Redovisningen innefattar således inte andra geotekniska konsekvenser såsom påverkan på grundläggning av byggnader och transportinfrastruktur eller VA-frågor till följd av förändrat klimat.

Institutet har valt att som underlag för denna handlingsplan genomföra tre delutredningar för att specifikt beskriva skred och ras, erosion och översvämningar respektive föroreningsspridning. Föreliggande rapport redovisar deluppdraget om föroreningsspridning och har sammanställts av Gunnel Nilsson, Håkan Rosqvist, Yvonne Andersson-Sköld, Peter Starzec och Jenny Norrman, samtliga SGI. Värdefulla synpunkter och kommentarer har lämnats av Markku Rummukainen, Gunn Persson, Lars Johansson och Johan Andréasson, samtliga SMHI.

Linköping i september 2005

Författarna



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Förord</b>                                                                            | 3  |
| <b>Sammanfattning</b>                                                                    | 6  |
| <b>1 Inledning</b>                                                                       | 8  |
| 1.1 Bakgrund                                                                             | 8  |
| 1.2 Syfte och omfattning                                                                 | 8  |
| <b>2 Klimatförändringar</b>                                                              | 9  |
| 2.1 Allmänt                                                                              | 9  |
| 2.2 Klimatförändringar i Norden                                                          | 9  |
| <b>3 Föroreningssituationen i Sverige</b>                                                | 12 |
| 3.1 Förorenade områden                                                                   | 12 |
| 3.2 Deponier                                                                             | 13 |
| 3.2.1 Inledning med historik                                                             | 13 |
| 3.2.2 Gamla soptippar                                                                    | 13 |
| 3.2.3 Moderna deponier                                                                   | 14 |
| <b>4 Faktorer som inverkar på föroreningsspridningen</b>                                 | 16 |
| 4.1 Platsspecifika egenskaper                                                            | 16 |
| 4.2 Ämnesspecifika egenskaper                                                            | 16 |
| 4.2.1 Vattentrogna ämnen                                                                 | 17 |
| 4.2.2 Tungmetaller                                                                       | 17 |
| 4.2.3 LNAPL – Light Non Aqueous Phase Liquid                                             | 17 |
| 4.2.4 DNAPL – Dense Non Aqueous Phase Liquid                                             | 18 |
| <b>5 Möjliga förändringar av föroreningssituationen till följd av klimatförändringar</b> | 19 |
| <b>6 Exemplifiering utifrån klimatscenarier i olika delar av landet</b>                  | 24 |
| 6.1 Förutsatta klimatförändringar för exemplifiering                                     | 24 |
| 6.2 Förorenade områden                                                                   | 26 |
| 6.3 Gamla soptippar och moderna deponier – effekter av klimatscenarierna                 | 27 |
| 6.3.1 Beräkning av lakvattenbildning från gamla soptippar                                | 28 |
| 6.3.2 Beräkning av perkolation genom sluttäckning för moderna deponier                   | 31 |
| <b>7 Diskussion</b>                                                                      | 34 |
| 7.1 Förändrade miljörisker från förorenade områden                                       | 34 |
| 7.2 Förändrade miljörisker från gamla soptippar och moderna deponier                     | 35 |
| <b>8 Slutsatser</b>                                                                      | 37 |
| <b>9 FoU-behov</b>                                                                       | 38 |
| <b>Referenser</b>                                                                        | 39 |

## SAMMANFATTNING

Syftet med denna rapport är att klargöra, genom en generell beskrivning och enkla beräkningar, hur prognostiserade och beräknade klimatförändringar kan komma att inverka på industriförorenade markområden, avfallsdeponier och gamla soptippar. I rapporten ges också en generell bild över hur föroreningsituationen ser ut i Sverige idag med avseende på nämnda områden. I rapporten anges behov av kunskap som behövs för att kunna förebygga och anpassa samhället till förväntade klimatförändringar.

Klimatförändringar studeras i globala och regionala klimatmodeller, i vilka scenarier för nordiska förhållanden redovisas av SMHI:s Rossby Centre. Scenarierna visar att klimatförändringarna kommer att bli särskilt stora i områden med arktiskt klimat men även i kalltempererat klimat, till exempel i de nordiska länderna och i Baltikum. Prognosen för nederbörden i Norden, bortsett från Sydsandinavien under sommaren, tyder på mera nederbörd. Nederbördens och vattentillgångens årsmedelvärden bedöms öka med upp till så mycket som 30 % till år 2100. Ökningen kan orsakas av fler nederbördsdagar och häftigare regn. Nederbörden förutspås ökar relativt jämnt på höst, vår och vinter, men under sommartid beräknas nederbörden bli intensivare, trots att den i medeltal minskar något. Scenarierna för Skandinavien tyder på att årsmedeltemperaturen i Sverige kan komma att öka med mellan 2,5 och 4,5 grader till år 2100. Jämfört med temperaturökningen för helåret påverkas vintertemperaturen något mer och sommartemperaturen något mindre. Förändring i temperatur och nederbörd kommer inverka på grundvattenbildning, tillrinningen till vattendragen och därmed också vattendragens flöden, som kan komma att bli högre under flödestopparna.

En stigning av världshavens medelvattennivå sker på grund av glaciäravsmältningen och på grund av en ökning av temperaturen i havet och därav orsakad volymexpansion. Fram till år 2100 beräknas dessa påverka världshavets genomsnittliga vattenstånd med mellan 9 och 88 cm. Regionala förändringar i havsvattenståndet kan dock bli något mindre eller betydligt större. I Sverige riskerar speciellt Skåne att utsättas för en långsiktig och bestående vattenståndshöjning som i sin tur leder till större risk för erosion längs stränderna.

En höjd havsnivå (ytvatten) kommer att innebära att kustnära markområden översvämmas och förenade markområden i känsliga områden därmed kan komma att ställas under vatten. Naturvårdsverket uppskattar att det finns ca 50 000 områden som är eller kan vara förorenade. En stor andel av dessa markområden är belägna invid ytvattendrag. Konsekvenserna av förändrade flöden kan, utöver den ökade risken för människors hälsa, bli påverkan på ekomiljön i ytvattendraget, driftstörningar i reningsverk som ofta ligger lågt i terrängen, förstörda badvatten etc. Framtida klimatförändringar kommer sannolikt att påverka vattnets förekomst och rörelse i marken och i föreliggande rapport beskrivs troliga konsekvenser av detta.

En ökning av nederbörd, inte minst kraftigare regnintensitet, kan leda till kraftigare ytvavrinning. Föregås nederbörden av långvarig torka kan det leda till kraftigare erosion och kraftigare slamströmmar. Detta kommer sannolikt att leda till snabbare och mer omfattande spridning av föroreningar från områden med förorenad mark eller där avfallsdeponier (främst gamla soptippar) är belägna. I vissa områden kan de således finnas en risk att yt- och grundvattenresurser kan komma att hotas. För deponier kan en ökad nederbördsmängd vara kritiskt med avseende på dagens krav på sluttäckning. I dag utformas dessa täckskikt för att klara en maximal genomsläppning av 50 mm nederbörd per år, baserat på dagens nederbördsförhållanden. Resultaten de beräkningar som utförts inom detta uppdrag visar att i det fall nederbörden ökar med 25 % kommer inte utförda sluttäckningar att klara de hydrauliska kraven. Förändringar i nederbörd och ytvattennivåer kommer även komma att inverka på grundvattenbildningen. Resultaten av de enkla simuleringarna som gjorts för att illustrera hur föroreningstransporten förändras vid höjd

grundvattennivå och ökad grundvattengradient visar dels på en ökad spridning och dels på att transporthastigheten påskyndas.

I existerande metoder för bedömning/analys av miljö- och hälsorisker från förorenade områden tas inte hänsyn till hur extrema vädersituationer eller förändringar i klimatet skulle kunna inverka på föroreningsbilden. Den riskbild som således anges för ett område (och som inte åtgärdas) kan i framtiden komma att ändras. Vi vet idag ganska lite om hur förändringar i klimatet inverkar på föroreningssituationen i Sverige. Utifrån den information som inhämtats till föreliggande rapport framgår att behovet av ökad kunskap inom området är stort. Forskning kommer att kräva ett nära samarbete mellan olika discipliner (geotekniker, hydrologer, hydrogeologer, kemister, ekotoxikologer, biologer m.fl.) för att kunna lära mer om hur förändringar i klimat kan komma att inverka på olika typer av förorenade markområden.

## 1 INLEDNING

### 1.1 Bakgrund

Regeringen har i regleringsbrev M2004/4162/A gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att redovisa en handlingsplan för institutets arbete de närmaste åren med att förutse och verka förebyggande för att förhindra riskerna för ras och skred med anledning, bland annat av, att nederbördsmängderna kan komma att öka vid ett förändrat klimat. Institutet har valt att begränsa uppdraget till att innefatta naturolyckor, det vill säga ras, skred, erosion, översvämning och tillhörande miljökonsekvenser och innefattar således ej andra geotekniska konsekvenser såsom påverkan på grundläggningar, nedsatt bärförmåga eller VA-frågor till följd av förändrat klimat.

I ovanstående uppdrag har SGI valt att ta fram underlag som specifikt beskrivs i tre delrapporter:

*Släntstabilitet i jord – konsekvenser av ett förändrat klimat. SGI Varia 560-1.*

*Stranderosion och översvämningar – konsekvenser av ett förändrat klimat. SGI Varia 560-2.*

*Föroreningsspridning – konsekvenser av ett förändrat klimat. SGI Varia 560-3.*

Beskrivningen görs genom att försöka kvantifiera och exemplifiera vilka effekter som kan förväntas i Sverige. Utgångspunkt är förväntade klimatförändringar och dagens kunskap om relationer mellan klimat och miljögeotekniska egenskaper. Föreliggande rapport redovisar förväntade effekter på föroreningsspridning i mark och vatten.

### 1.2 Syfte och omfattning

För att uppnå de nationella miljömålen, och inte minst miljömålen giftfri miljö samt begränsad klimatpåverkan, är det viktigt att anpassa åtgärder för förorenade områden. Anpassning bör göras så att en åtgärd för ett förorenat område utförs på ett sådant sätt att bidragen till växthusgaser minimeras. Hänsyn måste också tas till hur föroreningssituationen kan förväntas se ut, eller förändras, enligt förväntade klimatförändringar.

Som ett underlag till ovan nämnda handlingsplan har SGI studerat förhållanden och konsekvenser avseende föroreningsspridning. Syftet med föreliggande rapport är att i ett första steg beskriva och tydliggöra hur ett förändrat klimat teoretiskt kan inverkar på markföroreningssituationen i Sverige. En stor andel av de områden i Sverige som är förorenade representeras av industri- och av deponier. Uppdraget har därför begränsats till att omfatta industrier samt deponier.



## 2 KLIMATFÖRÄNDRINGAR

### 2.1 Allmänt

Mycket tyder på att det globala klimatet håller på att förändras och det mest tydliga tecknet på förändring är den uppmätta höjningen av jordens medeltemperatur. Detta konstateras exempelvis av IPCC (2001), EEA (2004) och av WHO (2002). De avsmältningar som uppmäts av exempelvis glaciärer och av havsis på Arktis, stödjer bilden av en pågående global uppvärmning. Den främsta orsaken till uppvärmningen av jorden under de senaste 30–50 åren verkar ha varit utsläppen av växthusgaser. Även det framtida klimatet beror bland annat på omfattningen och typen av utsläpp. Eftersom det är svårt att på kort tid reducera utsläppen tyder de klimatscenarier som gjorts på att det fortsätter bli varmare även under de närmaste 50 till 100 åren (t.ex. IPCC, 2001, SMHI, 2005).

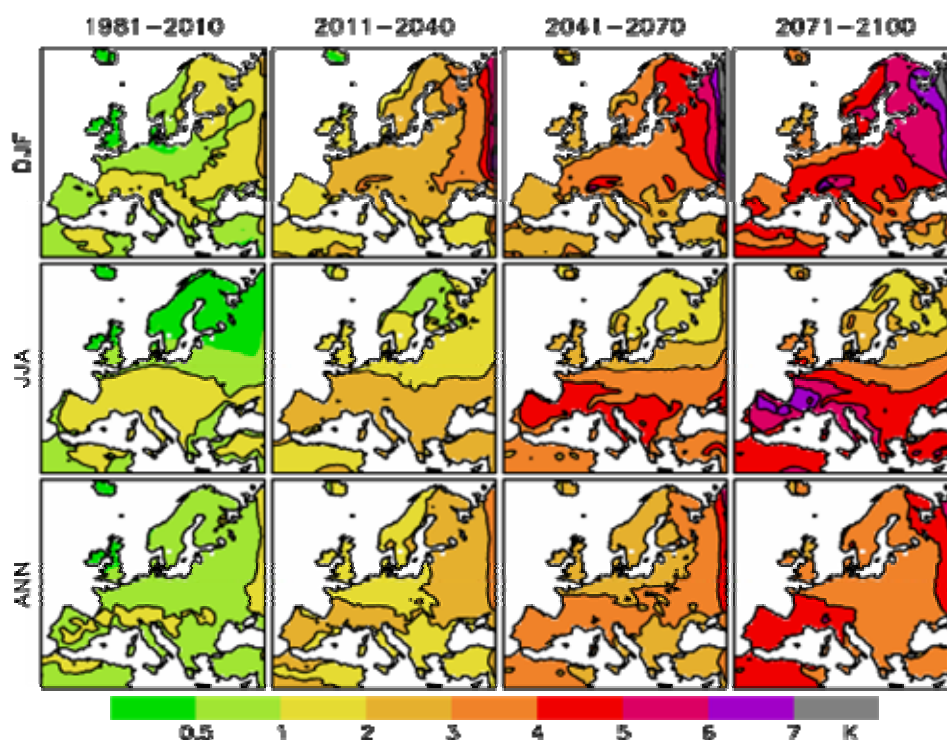
En förhöjd temperatur kan leda till en ökad avdunstning samtidigt som en varmare atmosfär kan innehålla mer vatten. Detta påverkar vattnets kretslopp och möjliggör exempelvis fler och håftigare regn. Det kan också leda till starkare, svåra stormar och förändringar i andra typer av extrema vädersituationer.

Klimatförändringar studeras i olika globala och regionala klimatmodeller. Scenarier för nordiska förhållanden redovisas av SMHI:s Rossby Centre (se SMHI, 2005a, och SMHI, 2005b). Scenarier visar att klimatförändringen kommer att bli särskilt stor i områden med arktiskt klimat, men även områden med kalltempererat klimat kommer att få stora förändringar. Framförallt påverkas dessa områden, vilka innefattar de nordiska länderna och Baltikum, vintertid. Längre söderut i Europa beräknas speciellt somrarna bli varmare och torrare.

### 2.2 Klimatförändringar i Norden

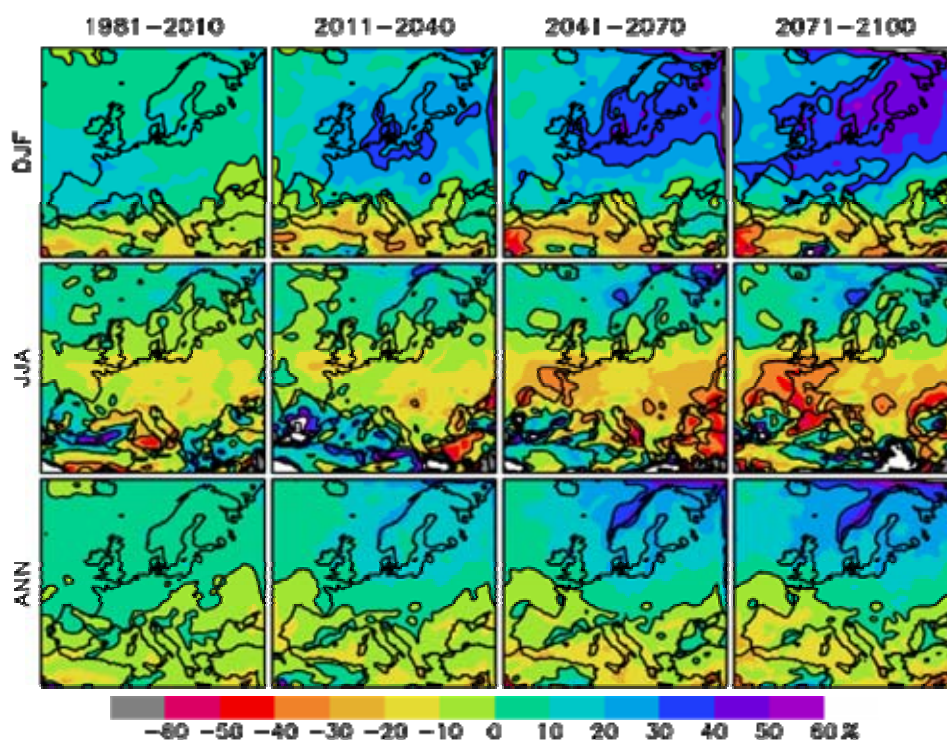
Mellan åren 1996 och 2003 genomfördes ett svenskt regionalt klimatmodelleringsprogram, SWECLIM (Swedish Regional Climate Modelling program). Inom SWECLIM utfördes regionala klimatscenarier utifrån ett par utsläppsscenarier och olika globala modeller. I utvärderingen har simuleringarna jämförts mot mätdata över Sverige. Sedan SWECLIM avslutades, har detta arbete fortsatt vid SMHI:s Rossby Centre. I den svenska klimatmodelleringen har man utgått från dels den tyska globala klimatmodellen ECHAM4/OPYC3 från Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ) och Max-Planck institutet för meteorologi i Hamburg, dels från globala klimatmodeller vid Hadley Centre i Storbritannien (Hadley Centre, 2005).

Medan de regionala klimatscenarierna som studerades inom SWECLIM avsåg perioden 2071–2100, har man senare vid Rossby Centre tagit fram beräkningar som sträcker sig från dagens klimat (det vill säga perioden 1961–90) fram till år 2100 (se SMHI, 2005a). Resultaten visar att årsmedeltemperaturen i Sverige kan komma att öka med mellan 2,5 och 4,5 grader. Jämfört med temperaturökningen för helåret påverkas vintertemperaturen något mer och sommartemperaturen något mindre. Resultatet kan bli att årstiderna förskjuts och att vi får en kortare vintersäsong. De beräknade förändringarna framträder som signifikanta redan vid början av 2000-talet, se **Figur 2-1**.



Figur 2-1. Beräknade regionala temperaturändringar (°C) på vintern (DJF, överst), på sommaren (JJA, mellersta raden) och för helåret (ANN, längst ner). Ändringarna visas jämfört med perioden 1961–1990. Dessa regionala beräkningar är gjorda vid Rossby Centre på SMHI med den regionala klimatmodellen RCAO och baseras på beräkningar med den tyska ECHAM4/OPY3 globala klimatmodellen och ett utsläppsscenario enligt s.k. SRES B2. (SMHI, 2005a).

Beräkningar av nederbördsscenarierna i Norden, bortsett från södra Skandinavien under sommaren, indikerar att en större mängd nederbörd kan förväntas (se **Figur 2-2**). Nederbördens och vattentillgångens årsmedelvärden för hela landet bedöms öka upp till 30 %. Ökningen orsakas både av fler nederbördsdagar och av häftigare regn. Nederbördsmängderna ökar under höst, vår och vinter. Sommartid ändras nederbördsmängderna mindre i landets norra delar medan de minskar i Sydsverige där nederbörden ändå blir intensivare. För vissa delar av södra Sverige kan den ökade medeltemperaturen dock ge en ökad avdunstning från mark och vatten, vilket kan medföra ett vattenunderskott.



Figur 2-2. Beräknad regional nederbördsförändring (%) jämfört med perioden 1961–1990. Övriga förutsättningar enligt Figur 2-1. (SMHI, 2005a).

Havsnivån kommer att stiga på grund av klimatförändringarna. Detta eftersom en ökad medeltemperatur leder till en avsmältning av glaciärer samt en termisk expansion av världshaven. Redan idag stiger nivån i världshaven med cirka 1–2 mm/år enligt Church et al (2001). De scenarier som redovisas av SMHI för åren fram till 2100 visar att höjningen av havsvattenytans regionala nivå påverkas både av den globala höjningen och lokala effekter. I södra Sverige kan havsytans nivå stiga med över 50 cm. Ett förändrat klimat kommer dessutom även att påverka vindar och vågor längs våra kuster.

### 3 FÖRORENINGSSITUATIONEN I SVERIGE

#### 3.1 Förorenade områden

I Sverige uppskattar Naturvårdsverket att det finns ca 50 000 områden som är eller kan vara förorenade (Naturvårdsverket, 2004). Till och med år 2004 har ca 40 000 områden inventerats av landets länsstyrelser och av dessa har ca 8 400 objekt miljöriskklassats enligt Naturvårdsverkets metodik för inventering av förorenade områden (Naturvårdsverket, 2004). Riskklass 1 avser mycket hög risk och riskklass 4 avser låg risk med avseende på människors hälsa och omgivande miljö. Den totala andelen riskklass 1-objekt uppskattas till ca 1 500 och andelen riskklass 2-objekt till ca 10 000 (Naturvårdsverket, 2004). Områden som tilldelats riskklass 1 är prioriterade för åtgärd.

På de förorenade områdena förekommer det ofta en komplex föroreningssammansättning, t.ex. en blandning av en eller flera metaller, olja eller andra organiska och oorganiska ämnen. Såväl föroreningens omfattning som vad den utgörs av beror på vilken typ av verksamhet som har bedrivits, när den pågått och hur restprodukter, spill, avfall etc. har hanterats. Vid äldre industriområden är det inte ovanligt att avfall mer eller mindre har dumpats inom området, medan den förorening som sker idag främst beror på olyckshändelser. Exempel på markområden som har eller kan ha förorenats är t.ex. områden med träimpregneringsverksamhet, garverier, kemtvättar, bensinstationer, kemiska industrier, textilindustrier, färgindustrier, sågverk, massafabriker, områden där det använts stora mängder bekämpningsmedel, hamnanläggningar, raffinaderier m.fl. och framförallt på platser där verksamheten pågått länge eller förekommit innan det fanns någon lagstiftning med avseende på miljöhänsyn (till exempel Naturvårdsverket, 1995).

I ett historiskt perspektiv har industrier och industriell verksamhet lokaliserats intill ytvattendrag för att kunna utnyttja vattnet som transportväg. Vatten har också varit nödvändig i flera processer, till exempel för uttag av kylvatten eller som kraftkälla för energiproduktion. Efter en översiktlig genomgång av de geologiska förhållandena i en stor del av våra älvdalar är ett rimligt antagande att marken i huvudsak består av finsediment och med en flack marklutning mot ytvattendraget. Grundvattennivåerna i sådana älvdalar ligger normalt inte särskilt djupt och strax intill ytvattendraget kan grundvattennivån ligga i närheten av ytvattennivån. Det finns naturligtvis exempel på förorenade områden intill ytvattendrag där marken istället utgörs av grövre material (sand, grus). Ett sådant material ökar förutsättningarna för spridning, både vertikalt och horisontellt.

Göta älvs dalgång är ett typexempel på en älvdal bestående av finsediment, flack lutning, ytnära grundvatten och med en lång industriell historia där flera dokumenterat förorenade områden finns. Andra exempel på förorenade älvdalar är Viskan som bland annat är påverkad av föroreningar från textilindustrier, Ångermanälven kring Kramfors där flera områden förorenats genom träimpregneringsverksamheter, sågverk och massaindustrier, Ljungans dalgång kring Sundsvall och utloppet i Östersjön, Motala ström som bland annat rinner igenom Skärblacka och Fiskeby där massaindustrier också är belägna, för att nämna några.

För bebyggda områden gäller i de flesta fall att de översta marklagret utgörs av fyllnadsmassor som lagts på den naturliga jorden, efter att växtlighet och matjord har schaktats bort. Fyllnadsmassorna kan bestå av naturligt material (sten, grus, sand, silt, ler). I andra fall, speciellt äldre industrifastigheter, kan fyllnadsmassorna också bestå av rivningsrester (tegel, trä, skrot etc.) eller avfallsmassor från andra verksamheter (slagg, askor, hushållsavfall etc.). Inom industriområden som förorenats förekommer vanligen den mesta föroreningen i detta fyllnadslager. Med tiden lakar dock föroreningen ut och kan skada omgivande miljö.

## 3.2 Deponier

### 3.2.1 Inledning med historik

Avfallshanteringen i Sverige har under de senaste ca 50 åren genomgått en omfattande struktur-omvandling och under senare decennier har det skett omfattande förändringar med avseende på avfallsbegreppet och uppkomst av avfall. Mängden avfall som genereras i samhället har varierat med tiden och de olika sätten att ta hand om, och göra sig av med, avfall har förändrats. Idag går trenden mot utökad förbränning av avfall och minskad deponering, det gäller hushållsavfall och visst verksamhetsavfall. Parallellt med de förändrade avfallsströmmarna i samhället har kraven på konstruktion och skötsel av deponier ändrats radikalt, från relativt okontrollerade soptippar till dagens noggrant konstruerade och kontrollerade deponier. Med tanke på att avfallets sammansättning och innehåll har ändrats med tiden och att deponiernas konstruktion och tekniska installationer också har förändrats är det relevant att dela upp våra avfallsupplag i två grupper, dels de *gamla soptipparna* och dels de *moderna deponierna*.

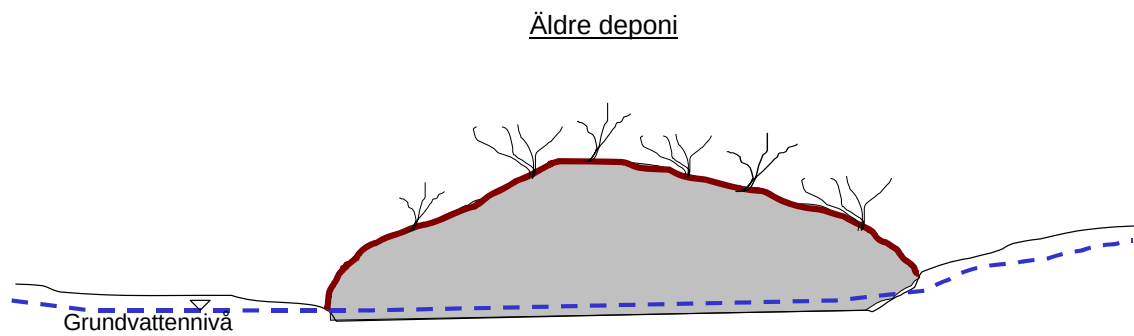
Dagens deponier tar i huvudsak emot avfall från hushåll, industrier och avfall till exempel i form av askor från energiproduktion och förorenade jordmassor m.m. Av de ca 73 miljoner ton avfall som uppstår årligen svarar industrin, framförallt gruvnäringen, för den största mängden, ca 62 miljoner ton ([www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se), 2005).

På deponierna har det samlats stora mängder föroreningar och miljögifter på en begränsad yta och med tiden är det ofrånkomligt att dessa ämnen läcker ut i den omgivande miljön. Lakvatten från deponier med hushållsavfall och industriavfall innehåller många olika föreningar som kan vara giftiga för organismer eller på annat sätt miljöfarliga. Med tanke på befintliga analysmetoder och kostnader för dessa är det endast realistiskt att analysera en bråkdel och kunskapen är därför begränsad om vilka föroreningar som finns i deponierna och vilka som hamnar i lakvattenet. Till följd av att kunskapen om lakvattnets sammansättning är bristfällig och att effekterna av de olika miljöpåverkande föreningarna är mycket olika är det svårt att generellt bedöma miljöpåverkan från deponier (Öman, 1998).

### 3.2.2 Gamla soptippar

I Sverige finns det sannolikt flera tusen äldre nedlagda soptippar som kan innehålla allt från hushållsavfall till gruvavfall. Till följd av obefintlig kontroll då avfallet tippades är soptipparnas innehåll ofta okänt och man kan konstatera att de i många fall sannolikt innehåller kraftigt miljöstörande ämnen. Dels genererade hushållen mer farligt avfall för cirka tre till fem decennier sedan, men framförallt användes de gamla soptipparna för dumpning av olika typer av industriavfall som i många fall innehöll kraftigt miljöstörande ämnen. De gamla soptipparna karakteriseras således av en ringa kontroll av det avfall som deponerats och liten kännedom om föroreningspåverkan från soptippen.

De gamla soptipparna har ofta sitt ursprung någon gång på 1940–50-talet eller ännu tidigare och de har ofta uppstått som ett resultat av ett behov av att göra sig av med avfall i liten skala, till exempel från en mindre ort eller annan samfällighet. En sådan soptipp har oftast lokaliserats helt utan någon tanke på omgivningspåverkan och inte så sällan ligger dessa soptippar i låglänta vattensjuka områden som traditionellt inte har haft något värde för jord- och skogsbruk eller annan verksamhet (**Figur 3-1**). Konsekvensen av detta har blivit att många gamla soptippar ligger i områden som har stor potential för föroreningsspridning till omgivande yt- och grundvattenresurser. Då soptipparna uppstod fanns det i princip inga konstruktioner, som till exempel botten tätning eller uppsamlingssystem för lakvatten, för att minska miljöbelastningen. Äldre soptippar som har avslutats under senare år har ofta försetts med en relativt god sluttäckning för att minska lakvattenbildningen, medan äldre avslutningar av soptippar ofta är bristfälliga med avseende på skydd mot föroreningsspridning till omgivningen. En del av de gamla soptipparna har vuxit i snabb takt och med tiden blivit stora deponier där man successivt har vidtagit åtgärder för att minska föroreningsbelastningen till soptippens omgivningar.



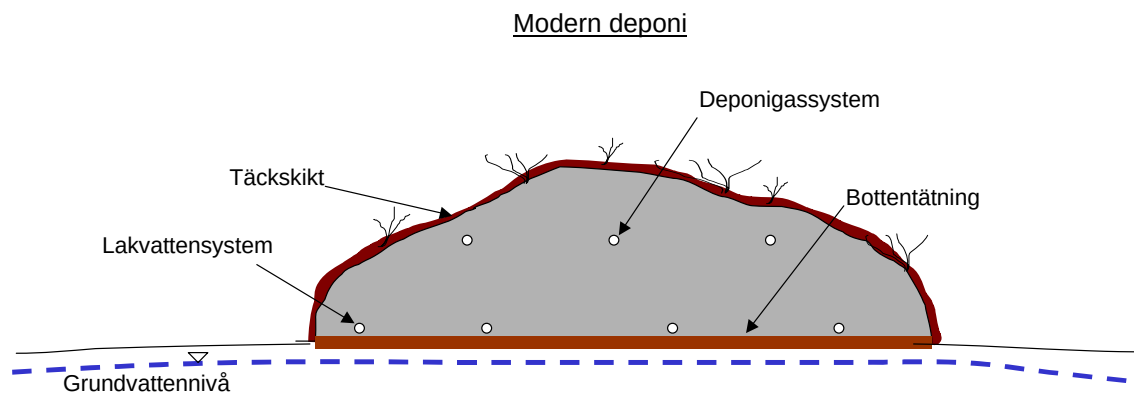
Figur 3-1. Principskiss av en gammal soptipp som har placerats i ett låglänt område med grundvattennivån nära markytan, där delar av avfallet ligger under grundvattennivån.

Till följd av de gamla soptipparnas status kan det konstateras att de sannolikt innehåller stora mängder miljöstörande ämnen och att de sannolikt står för en omfattande föroreningsspridning till yt- och grundvattenresurser. Framtida förändringar av spridningsförutsättningar som kan uppstå till följd av förändrade grundvattennivåer och kraftigare grundvattenfluktuationer kommer sannolikt att påverka, och i många fall påskynda, föroreningsspridningen från de gamla soptipparna.

### 3.2.3 Moderna deponier

Sedan 1994 har antalet deponier som tar emot mer än 50 ton avfall från kommunerna per år minskat från omkring 300 till 175 stycken och ytterligare deponier, framför allt sådana som tar emot små mängder, förväntas läggas ned under den närmaste framtiden. De moderna deponiernas storlek är högst varierande och enligt Svenska Renhållningsverksförbundet (RVF, 2005) tar landets 10 största deponier emot drygt 40 procent av avfallet, medan de 40 minsta deponierna inte tar emot mer än cirka en procent.

Dagens moderna deponier karakteriseras av omfattande krav på kännedom om det avfall som deponeras och på den tekniska utformningen av deponin (**Figur 3-2**). Idag finns noggranna anvisningar om hur deponier skall utformas, till exempel med avseende på dimensionering av lakvattenuppsamlingen, botten tätningen och täckskiktet. Det pågår på så sätt en omfattande förbättring av standarden på deponierna i Sverige och Europa som en direkt följd av ett EG-direktiv om deponering av avfall som kom 1999 (99/31/EG). Sverige införlivade EG-direktivet i svensk lagstiftning 2001 genom förordningen om deponering av avfall (SFS 2001:512). Med stöd av förordningen har Naturvårdsverket beslutat om föreskrifter om deponering av avfall (NFS 2004:10). Genom den nya förordningen ställs strängare krav, bland annat på deponiernas botten tätning och bottenbarriär samt på bortledning och uppsamling av lakvatten. Kraven skiljer sig beroenden på vilken typ av avfall deponin tar emot. De nya föreskrifterna innebär bl.a. ökade krav på kunskap om avfallets egenskaper hos den som producerar avfallet. För att underlätta implementeringen av EU-direktivet har Naturvårdsverket givit ut en Handbok med allmänna råd (Handbok 2004:2) om deponering av avfall. Handboken ger myndigheter och verksamhetsutövare vägledning i frågor som uppkommer vid tillämpning av deponeringsförordningen.



Figur 3-2. Principskiss av en modern deponi som är placerad över grundvattennivån och utrustad med bottentätning, täckskikt och system för uppsamling av lakvatten och deponigas.

Omkring 90 procent av det avfall som deponeras omhändertas på deponi med någon form av lakvattenuppsamling. Under senare år har mellan 8 och 12 miljoner kubikmeter lakvatten samlats upp årligen. Vid ett hundratal anläggningar överförs lakvattnet till kommunala avloppsreningsverk. Dessa avloppsreningsverk är emellertid inte alltid anpassade för omhändertagande av lakvatten vilket kan medföra svårigheter i reningsprocessen. Vid ungefär 140 anläggningar sker lokal lakvattenrening antingen som enda reningsmetod eller i kombination med avloppsreningsverk. Målet är att allt lakvatten ska behandlas i direkt anslutning till deponierna i reningsanläggningar som är anpassade för lakvatten. (RVF, 2005).



## 4 FAKTORER SOM INVERKAR PÅ FÖRORENINGSSPRIDNINGEN

### 4.1 Platsspecifika egenskaper

Transport av föroreningar från markytan ner till underliggande jordlager och till grundvattnet, sker normalt via infiltration och perkolation av regnvatten, eller via en fluktuerande grundvattenyta. Markens uppbyggnad har stor betydelse för förutsättningarna för en förorening att spridas eller, omvänt, hindras att spridas.

I områden med finsediment har det vanligen utbildats en torrskropa (vanligen i lerigt material) i de översta marklagret. Detta innebär att ett nätverk av sprickor, synliga och mikroskopiska, har utbildats. Infiltration och perkolation av regnvatten genom torrskorpan sker huvudsakligen genom torrskorpans sprickor. Dessa sprickor är också transportvägar för föroreningar. Finsediment innebär dessutom att marken har svårt att svälja vattnet vid kraftiga nederbörd vilket medför att överytan snabbt blir vattenmättad med ökad ytavrinning, mot till exempel ett ytvattendrag, som följd. Kraftig ytavrinning kan medföra erosion av markytan som i sig kan dra med sig föroreningar.

Betydelsefullt för nedtransport genom den omättade zonen är markens förmåga att släppa igenom en vätska. Genomsläppligheten beror av jordens porositet, som i sin tur beror av jordens sammansättning av olika kornstorlekar och hur jorden är packad. När väl en förorening nått grundvattnet kan det spridas vidare till andra områden via grundvattenflödet. Grundvattnets flödes hastighet beror av jordens förmåga att leda vatten (så kallad hydraulisk konduktivitet), grundvattenytans lutning (gradient) och jordens effektiva porositet (det vill säga den del av porerna som är tillgängliga för vätsketransport). Generellt, ju högre flödes hastighet desto snabbare föroreningsspridning. Den hydrauliska konduktiviteten varierar beroende jordart, till exempel varierar den hydrauliska konduktiviteten för sand mellan ca  $10^{-6}$  –  $10^{-3}$  m/s, för silt mellan ca  $10^{-9}$  –  $10^{-5}$  m/s, för lera ca  $10^{-12}$  –  $10^{-8}$  m/s. Variationen beror på heterogeniteten och packningsgrad. Fyllnadsmaterial har normalt en relativt hög hydraulisk konduktivitet på grund av materialets ofta höga heterogenitet och förhållandevis lösa packning.

Normalt sker föroreningstransporten långsammare än grundvattnets flödes hastighet. Detta beror på en rad olika processer, som till exempel utspädningseffekter, fastläggning till partiklar och organiskt material, kemisk omvandling och biologisk nedbrytning. Ofta sammanställs dessa faktorer i vad som kallas retardation (fördröjning). Även den kemiska omvandlingen som den biologiska nedbrytningen beror på markens egenskaper. Utöver temperatur, vattentillgång och växtlighet påverkar även andra förutsättningar, såsom pH, tillgång på syre och markens biologiska och kemiska sammansättning. På vilket sätt dessa faktorer påverkar spridningen av en förorening beror på dess egenskaper.

### 4.2 Ämnesspecifika egenskaper

Ämnesspecifika egenskaper som påverkar hur en förorening sprids är bland annat ämnets densitet, dess flyktighet, benägenhet att kemiskt reagera, biologisk nedbrytbarhet, vattenlöslighet och löslighet i organiskt material. Föroreningar med densitet som vatten och som är vattenlösliga följer i princip grundvattnets strömningsriktning. Föroreningar med densitet tyngre än vatten och med låg vattenlöslighet tenderar att sjunka ner genom markprofilen och följa markens struktur mer än grundvattnets flödesriktning. Ämnen med låg vattenlöslighet tenderar att ackumuleras på organiska ytor och i organiskt material som till exempel humus och i vattenlevande organismer. Markföroreningar kan delas in i fyra grupper som tillsammans beskriver de mest typiska egenskaperna:

- Vattentrogna ämnen som följer grundvattnets strömningsriktning.
- Tungmetaller.



- Fettlösliga organiska ämnen som är lättare än vatten (LNAPL – light non aqueous phase liquid).
- Fettlösliga organiska ämnen som är tyngre än vatten (DNAPL – dense non aqueous phase liquid).

Nedan redogörs för de olika gruppernas egenskaper.

#### 4.2.1 Vattentroga ämnen

Ett vattentroget ämne följer i det närmaste grundvattnets strömningsriktning och hastighet och kan därför transporteras långt från föroreningskällan och nå känsliga recipienter. För de flesta föroreningar avtar halten i grundvattnet med avståndet från källområdet på grund av fastläggning, nedbrytning etc. Detta gäller inte riktigt för vattentroga ämnen eftersom de varken läggs fast eller bryts ner särskilt väl. Vid gamla utsläpp kan förhållandet således vara tvärtom där högre halter förekommer ett par hundra meter från källområdet än inom och i närheten av detta. Spridning av vattentroga ämnen är självklart styrt av tillgången på vatten och flödet av detta.

Exempel på ett vattentroget ämne är metyl-tert-butyl-eter (MTBE). Eftersom ämnet är vattenlösligt kan regnvatten föra det med sig ner till grundvattnet och spridas långt med detta. Det finns uppgifter där MTBE påträffats ca 1 km från själva källan till utsläppet. Andra exempel på vattentroga ämnen är vissa salter som till exempel natriumklorid (vägsalt) och kalciumklorid.

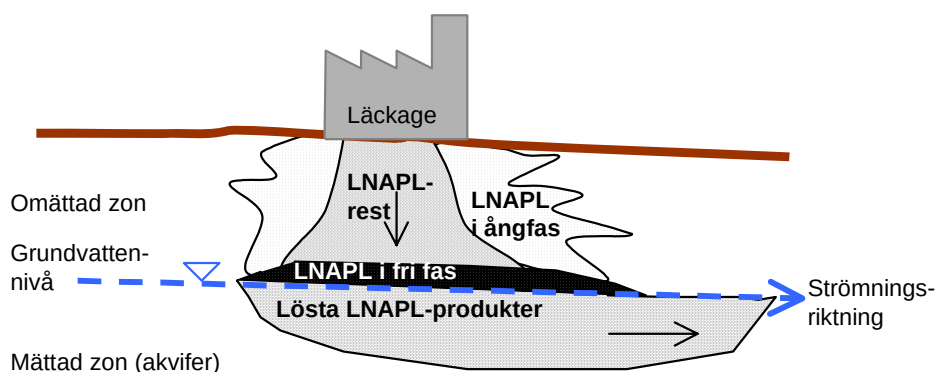
#### 4.2.2 Tungmetaller

De flesta ämnen är inte helt vattentroga utan dess spridning beror på kemiska och andra förutsättningar i marken. En viktig sådan föroreningsgrupp är tungmetaller. Arsenik (As), antimon (Sb), bly (Pb), kadmium (Cd), kvicksilver (Hg), krom (Cr), kobolt (Co), koppar (Cu), nickel (Ni), vanadin (V), zink (Zn) utgör de mest miljöfarliga tungmetallerna. Metaller förekommer mer eller mindre vid de flesta förorenade områdena. Olika metaller har olika förmåga att binda till jordpartiklar och organiskt material, vilket delvis beror på i vilken form metallen förekommer. Lösligheten hos flera metaller är dessutom beroende av markens pH och redoxförhållande.

#### 4.2.3 LNAPL – Light Non Aqueous Phase Liquid

Gruppen LNAPL innefattas av ämnen som är lättare än vatten och inte lätt löser sig i vatten. LNAPL kan finnas där till exempel olja har hanterats (bensinstationer, verkstäder, raffinaderier med flera). När LNAPL når grundvattnet lägger det sig som en hinna på grundvattenytan och följer normalt grundvattnets strömningsriktning (**Figur 4-1**). Flertalet LNAPL tillhör gruppen flyktiga organiska ämnen (Volatile organic compounds, VOC), det vill säga de tenderar att avgå från vätskefas till gasfas och kan därmed förekomma som gas i markens porsystem.

Förändring i grundvattennivåer, grundvattengradient, ytavrinning, markfukt etc. inverkar på möjligheten för LNAPL att spridas och transporteras med vatten. Förändring av mark- och lufttemperatur inverkar på hur stor andel som avgår i gasfas. Spridning av LNAPL begränsas av fastläggning till partiklar och organiskt material samt eventuell nedbrytning. Vid rätt förutsättningar i marken kan flertalet LNAPL brytas ner genom bakteriell aktivitet. Höjd temperatur i marken och ökad tillgång på vatten kan förväntas påskynda och därmed inverka positivt på bakteriell nedbrytning.

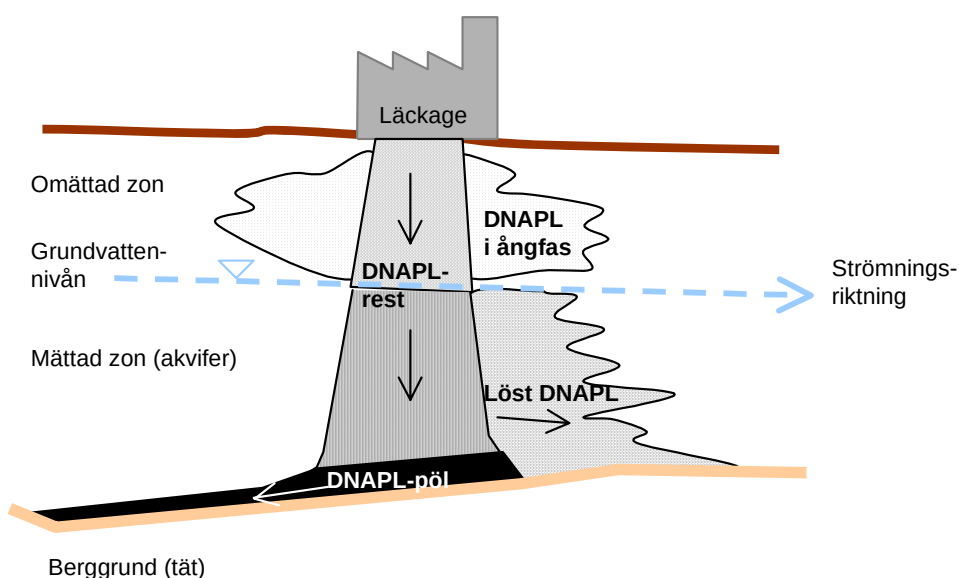


Figur 4-1. Bild som schematiskt visar hur LNAPL kan förekomma i marken, som fri fas, löst i vattnet, som ånga. (Modifierat efter Fetter, 2001).

#### 4.2.4 DNAPL – Dense Non Aqueous Phase Liquid

Gruppen DNAPL innefattas av ämnen som är tyngre än vatten och har svårt att lösas i, eller blandas med, vatten. Vissa PAH och klorerade kolväten är exempel på DNAPL. PAH har påträffats vid flera olika industrier som träimpregneringsanläggningar, gasverk, oljedepåer, ben-sinstationer, textilindustrier, verkstäder, gummiproduktion, vid vägkanter och i släckvatten från bränder med flera. Klorerade kolväten har bland annat påträffats i mark vid impregneringsanläggningar, till exempel pentaklorfenol (PCP), och vid kemtvättar, till exempel trikloretyeln (TRI).

DNAPL är mer beroende av geologin än av vattenförhållandena för att spridas och kan således spridas helt i motsatt riktning till grundvattnets strömningsriktning. Spridning och transport av DNAPL styrs till stor del av markens nätverk av sprickor. En del av de DNAPL som når grundvattnet kommer att lösas i vatten och följa detta, men en större del kommer sjunka ner i marken tills det når ett tätande skikt (lera, berg) och lägga sig på det (**Figur 4-2**). Liksom för LNAPL fördröjs spridningen på grund av fastläggning. DNAPL är dock mer svårnedbrytbart än LNAPL.



Figur 4-2. Bild som schematiskt visar hur DNAPL kan förekomma i marken, som fri fas, ångfas, löst i vattnet och ansamlad på tätande skikt. (Modifierat efter Fetter, 2001).

## 5 MÖJLIGA FÖRÄNDRINGAR AV FÖRORENINGSSITUATIONEN TILL FÖLJD AV KLIMATFÖRÄNDRINGAR

Hur föroreningar i marken påverkas av ett föränderligt klimat är inte särskilt väl utrett och det finns än så länge få studier som tar upp de miljömässiga konsekvenserna av framtida klimatförändringar från förorenade industri- och deponiområden. I en artikel av Kelly och Winchester (2005) påpekas det att det saknas kunskap om processerna som styr effekterna av de förmodade framtida klimatförändringarna, men att det sannolikt kommer att kraftigt påverka förorenings-spridningen från deponier. I Sverige har problematiken med klimatförändringarnas inverkan på förorenad mark eller deponier inte blivit uppmärksammat i någon större omfattning. Några exempel finns dock, till exempel så diskuteras påverkan på sluttäckning av deponier av framtida klimatförändringar i Rosqvist och Berglund, (2004).

Förorenade områden intill ytvattendrag är känsliga för förändringar i flöden på grund av risk för översvämning, fluktuationer i grundvattnets strömningsriktning (till/från ytvattendraget), risk för erosion av strandbrinken, risk för minskad stabilitet i strandslätten mot ytvattendraget till följd av ökade flöden i ytvattendraget eftersom allt detta kan medföra att föroreningar dras ut i vattendraget.



Figur 5-1. Översvämningarna i Arvika år 2000. Arvika hamn. I bakgrunden syns bl.a. oljecisterner, skrotåtervinning och järnväg. (Foto: Åke Johansson, SGI).

Till följd av ökad nederbörd och höjda havsvattennivåer kan, periodvis eller permanent, utströmningsområdenas ytor öka, vilket i sin tur kan innebära att förorenade områden intill vattendrag kan komma att bli en del av utströmningsområdet. I de fall markytan inte är belägen mycket högre än vattenytan i ytvattnet är det inte ovanligt med översvämningar redan idag vid högvatten och/eller vid stora flöden. Översvämningar innebär att ytvattnet kommer i kontakt med större markarealer och kan därmed föra med sig partiklar, humus, näringsämnen och andra (förorenande) ämnen från marken och ut i vattendraget. Högre vattenstånd i våra hav kan komma att innebära att låglänta områden intill ytvatten ställs under vatten permanent, speciellt känslig är kusten kring Skåne.



Figur 5-2. Översvämningarna i Arvika år 2000. Invallning av och utpumpning av vatten för att förhindra att vatten stiger in på sågverksområdet. (Foto: Åke Johansson, SGI).

I områden med finsediment har marken dessutom svårt att svälja vattnet vid kraftiga nederbörd, vilket medför att överytan snabbt blir vattenmättad med ökad ytavrinning, mot till exempel ett ytvattendrag, som följd. Kraftig ytavrinning kan medföra erosion av markytan som i sig kan dra med sig föroreningar.

I områden där torrskorpa utbildats kan torrskorpors spricksystem innebära en ökad möjlighet för infiltration och perkolation av regnvatten liksom föroreningar, vilket medför en ökad sannolikhet för föroreningsspridning. En förändring i lufttemperaturen inverkar även på temperaturen i de översta marklagren. Högre marktemperatur kan innebära ökad uppsprickning av markytan och förlust av markfukt, vilket kan orsaka kapillär uppsugning av vatten från djupare liggande nivåer. Detta ökar således möjligheten för föroreningar att nå grund- och ytvatten. Klimatsimuleringar visar att en ökning av koncentrationen av växthusgaser kan associeras med minskad markfuktighet på norra halvklotets mid-latitudsomrar, främst beroende på högre avdunstning på vinter och vår, orsakad av högre temperaturer och minskat snötäcke, och minskad nederbörd under somrarna ([www.grida.no](http://www.grida.no), 2005). En jords känslighet för klimatförändringar varierar med jordart där känsligheten ökar med en jords minskade vattenhållande kapacitet.

Det är oklart på vilket sätt klimatförändringarna kommer att påverka grundvattenförhållanden i Sverige. En ökad nederbörd, som i sig leder till ökad grundvattenbildning, motverkas av den avdunstning en ökad temperatur genererar. Under perioder med mycket nederbörd kommer dock grundvattennivån att öka. Förändringar i grundvattennivåer kan komma att innebära signifikanta förändringar på spridningsmöjligheterna med ökad/minskad kontakt grundvatten/förorenad jord/avfall och därmed förändring i spridningspotentialen.

Grundvattnet fluktuerar redan idag vid långvariga regn eller långvarig torka, men frekvensen av stigande/sjunkande grundvattennivåer kan dock komma att öka i och med att extremvädertillfällena förutspås öka. Stigande grundvattennivåer och ökade fluktuationer i grundvattennivåer kan komma att medföra att större delar av avfallet, i speciellt gamla soptippsområden, kan hamna under grundvattennivån, med ökad urtvättning och spridning av föroreningar som följd. En ökad fluktuation i grundvattennivån innebär vidare att övriga markförutsättning (syretillgång, biologisk aktivitet m.m.) förändras vilket påverkar omvandlings och nedbrytningsprocesser och hastigheter men också fastläggningssegenskaper etc. Extremväder, som häftiga regn, kan ge snabba föroreningspulser till yt- och grundvatten.

Förändrad säsongsvariationer, förändrad temperatur i stort och de förändrade hydrologiska förhållandena kommer att påverka vegetationen. Även den mikrobiella sammansättningen samt aktiviteten kommer att påverkas. Detta leder till en förändrad nedbrytningshastighet av organiska föroreningar, men kan också påverka vittring och den kemiska balansen i jorden. Vegetationsförändringar påverkar även vattenbalansen i marken.

En förändring i klimatet kommer enligt ovan att påverka förutsättningar för spridning, omvandling, nedbrytning av föroreningar såväl i ännu ej sanerade områden som i de områden som redan idag är åtgärdade på ett eller annat sätt, till exempel där förorenad jord deponerats, behandlats genom inneslutning, stabilisering/solidifiering eller olika typer av övertäckningsmetoder. En förhöjning av temperaturen innebär att förångning och mobilisering av vissa föroreningar kan komma att öka mer än vad som beräknats i dessa typer av åtgärdsmetoder. Därmed kan risken öka för exponering och spridning. På samma sätt kan exponering och spridning av ytligt liggande föroreningar som ännu inte åtgärdats påverkas.

I **Tabell 5-1** görs en översiktlig sammanställning över de prognostiserade klimatförändringarna i Sverige (Norden) tillsammans med vilka konsekvenser de skulle kunna medföra på förorenings-transport och -spridning från förorenade (ej åtgärdade) områden. I **Tabell 5-2** följer en övergripande sammanställning av effekter för äldre soptippar samt moderna deponier och för sannolika effekter på täckskikt. I tabellen beskrivs hur de prognostiserade förändringarna i klimatet teoretiskt kan inverka på föroreningsspridning från nya och gamla deponier.

Tabell 5-1. I tabellen beskriv hur de prognostiserade förändringarna i klimatet teoretiskt kan inverka på vattenflödet i marken och hur det teoretiskt kan påverka transport av föroreningar från ett förorenat område.

| Klimatförändring                                                                                                                                 | Hydrologisk konsekvens i mark och vatten                                                                          | Tänkbara effekter på förorenade markområden                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | <b>Risk för ökad föroreningsspridning i mark</b>                                                                                                                                                                     |
| Ökad nederbörd (fler dagar samt fler tillfällen med hög regnintensitet) samt vid perioder med ökad torka följt av perioder med intensivare regn. | Ändrade grundvattennivåer, förändringar i porttryck och ökade flöden i ytvatten samt ökad grundvattenfluktuation. | Ökad risk för spridning i samband med erosion, ras, skred sättningar m.m.                                                                                                                                            |
| Ökad nederbörd i form av fler nederbördsdagar.                                                                                                   | Stigande grundvattennivåer.                                                                                       | Ökad grundvattenkontakt med större mängd förorening samt kortare vertikal transportsträcka för förorening till följd av minskat avstånd mellan markyta och grundvattenzon.                                           |
| Fler tillfällen med hög regnintensitet (ev. även högre intensitet vid respektive tillfälle).                                                     | Tillfälliga och kraftiga fluktuationer av grundvattennivåer.                                                      | Som ovan.                                                                                                                                                                                                            |
| Ökad nederbörd i form av fler nederbördsdagar.                                                                                                   | Ökade utströmningsområden.                                                                                        | Ökad kommunikation mellan yt- och grundvatten: Områden som idag ligger intill utströmningsområden kan ställas under vatten. Eventuellt snabbare föroreningstransport från grundvatten till ytvatten, och vice versa. |
| Fler tillfällen med hög regnintensitet (ev. även högre intensitet vid respektive tillfälle).                                                     | Periodvis översvämningar av ytvattendrag.                                                                         | Som ovan.                                                                                                                                                                                                            |
| Höjd havsyttnivå, främst till följd av höjd temperatur (smältning av polarisar och inlandsisar). *                                               | Översvämningar av kustnära områden.                                                                               | Som ovan.                                                                                                                                                                                                            |
| Ökad nederbörd i form av fler nederbördsdagar och fler tillfällen med hög regnintensitet (ev. även högre intensitet vid respektive tillfälle).   | Ökad infiltration och perkolation samt mer frekvent fluktuation i grundvattennivåer.                              | Ökad "urtvättning" av förorening från jordmassan till grundvattnet.                                                                                                                                                  |
| Förhöjd temperatur<br>Ökad torka följt av perioder med intensivare regn.                                                                         | Uppspräckning av mark till följd av uttorkning under vissa perioder.                                              | Som ovan.                                                                                                                                                                                                            |
| Förhöjd temperatur<br>Ökad torka följt av perioder med intensivare regn.                                                                         | Ökad markfukt p.g.a. att en varmare luft kan hålla mer vatten.                                                    | Mäktigheten på den omättade zonen krymper, avståndet mellan markyta och grundvattennivå krymper, vilket innebär kortare transportsträcka till grundvattenzonen.                                                      |
| Förhöjd temperatur.                                                                                                                              | Regn istället för snö.                                                                                            | Längre tjälperioder med ökad sprickbildning i jorden som följd.                                                                                                                                                      |
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | <b>Risk för ökad föroreningsspridning med samtida utspädning.</b>                                                                                                                                                    |
| Fler tillfällen med hög regnintensitet (ev. även högre intensitet vid respektive tillfälle).                                                     | Tillfälligt högre gradient och därmed snabbare flöden.                                                            | Tillfälligt ökad transporthastighet på ämnen som följer grundvattnet.                                                                                                                                                |
| Ökad nederbörd i form av fler nederbördsdagar.                                                                                                   | Ökade grundvattengradienter och därmed snabbare flöden.                                                           | Ökad transporthastighet av föroreningar som följer grundvattnet.                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | <b>Minskad risk för föroreningsspridning i mark.</b>                                                                                                                                                                 |
| Förhöjd temperatur<br>Ökad torka följt av perioder med intensivare regn.                                                                         | Minskad markfukt p.g.a. ökad avdunstning till följd av höjd temperatur.                                           | Minskad vertikal transport av föroreningar med vatten.                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | <b>Minskad risk för föroreningsspridning i mark men ökad avgång till luft.</b>                                                                                                                                       |
| Förhöjd temperatur.                                                                                                                              |                                                                                                                   | Ökad avgång av flyktiga ämnen till luft.                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | <b>Osäkert om ökad eller minskad risk för spridning av förorening i mark.</b>                                                                                                                                        |
| Förändrad mikrobiell miljö samt vegetation.                                                                                                      | Förändringar i vegetationen inverkar på rotsystemen och därmed också på bakteriefloren.                           | Ökad/minskad kapacitet för nedbrytning, fastläggning, uppsugning.                                                                                                                                                    |

\* I nordöstra Sverige förutspås landhöjningen motverka höjning av havsnivån i Bottenhavet och Bottenviken. Konsekvenser till följd av höjd havsnivå bör således utebli under den 100-års period som är simulerad.

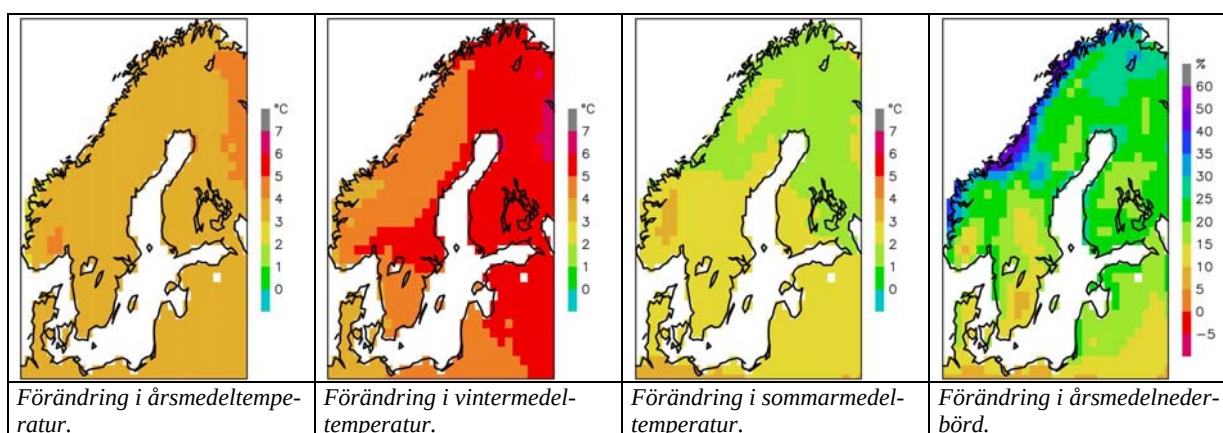
Tabell 5-2. I tabellen beskriv hur de prognostiserade förändringarna i klimatet teoretiskt kan inverka på vattenflödet i gamla soptippar och nya deponier och hur det teoretiskt kan påverka transport av föroreningar.

| Klimatförändring                                                                             | Konsekvens av klimatförändringar                                                                 | Tänkbara effekter av klimatförändringar på gamla soptippar respektive moderna deponier                                                                                                                                                      | Risk för ökad förorenings-spridning |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Ökad nederbörd.                                                                              | Högre grundvattennivåer.                                                                         | Grundvattnet stiger högre upp i avfallet vilket kan påskynda utlakning av föroreningar.                                                                                                                                                     | Ja                                  |
|                                                                                              | Ökade grundvattengradienter.                                                                     | Grundvattengradienter ökar vilket kan leda till en snabbare förorenings-spridning till omgivningen.                                                                                                                                         | Ja                                  |
|                                                                                              | Kombination av ovan.                                                                             | Samverkan kan avsevärt öka utlakningshastigheten.                                                                                                                                                                                           | Ja                                  |
|                                                                                              | Ökad infiltration.                                                                               | Ökad fukthalt i täcksikt och därmed ökad perkolation genom täcksiktet leder till ökad lakvattenproduktion och därmed större föroreningsbelastning på omgivande yt- och grundvattenresurser, samt på uppsamlingssystem vid moderna deponier. | Ja                                  |
|                                                                                              | Förhöjd ytavrinning.                                                                             | Ökad risk för erosionsskador på täcksikt.                                                                                                                                                                                                   | Ja                                  |
| Fler tillfällen med hög regnintensitet (ev. även högre intensitet vid respektive tillfälle). | Tillfälliga och kraftiga fluktuationer av grundvattennivåer.                                     | Ökad lakvattenproduktion och därmed större föroreningsbelastning på omgivande yt- och grundvattenresurser, samt på uppsamlingssystem vid moderna deponier.                                                                                  | Ja                                  |
|                                                                                              | Ökad infiltration.                                                                               | Ökad fukthalt i täcksikt och därmed ökad perkolation genom täcksiktet leder till ökad lakvattenproduktion och därmed större föroreningsbelastning på omgivande yt- och grundvattenresurser, samt på uppsamlingssystem vid moderna deponier. | Ja                                  |
|                                                                                              | Korta perioder med mycket hög ytavrinning.                                                       | Stor risk för mer omfattande erosionsskador på täcksikt.                                                                                                                                                                                    | Ja                                  |
| Förhöjd temperatur.                                                                          | Ökad evapotranspiration.                                                                         | Minskad fukthalt i täcksikt vilket medför lägre perkolation genom täcksiktet och därmed lägre lakvattenproduktion.                                                                                                                          | Nej                                 |
|                                                                                              | Minskat snödjup och kortare säsong med snötäcke                                                  | Kraftigare effekter av tjälning på täcksiktet vilket leder till större risk för tjälskador                                                                                                                                                  | Ja                                  |
|                                                                                              | Tjälning.                                                                                        | Minska säsongen för tjälning samt minskat tjälningsträngningsdjup.                                                                                                                                                                          | Nej                                 |
|                                                                                              | Uppsprickning av täcksikt till följd av periodvis uttorkning.                                    | Ökad infiltration i torrsprickor och därmed större lakvattenproduktion.                                                                                                                                                                     | Ja                                  |
| Ökad torka följt av perioder med intensivare regn.                                           | Snabb perkolation genom torrsprickor i täcksikt.                                                 | Avsevärt ökad infiltration och därmed större lakvattenproduktion, samt ökad risk för erosion, ras, skred sättningar.                                                                                                                        | Ja                                  |
| Förändrad vegetation samt mikrobiell miljö.                                                  | Vegetationen; nya arter kan etableras och påverka täcksiktets funktion.                          | Förändrad transpiration från växtlighet.                                                                                                                                                                                                    | Ja/Nej                              |
|                                                                                              | Förhöjd fukthalt i avfallet i deponin ger förändrade betingelser för de mikrobiella processerna. | Högre nedbrytningstakt leder till snabbare gasbildning, förändrade utlakningsprocesser samt snabbare utveckling av sättningar.                                                                                                              | Ja                                  |

## 6 EXEMPLIFIERING UTIFRÅN KLIMATSCENARIER I OLIKA DELAR AV LANDET

### 6.1 Förutsatta klimatförändringar för exemplifiering

I syfte att mer konkret försöka beskriva samt uppskatta i vilken omfattning förväntad klimatförändring kommer att påverka förorenings-spridning för svenska förhållanden har enkla exempel tagits fram och enkla simuleringar utförts. Dessa är baserade på förändrad årsnederbörd och temperatur i Sverige mellan perioderna 1961–1990 och 2071–2100 enligt scenarioräkningar av SMHI Rossby Centre ([www.smhi.se](http://www.smhi.se), 2005). Beräknad förändring framgår av **Figur 6-1**. Eftersom förändringarna beräknas variera över Sverige har tre scenarier valts. Dessa beskrivs nedan.

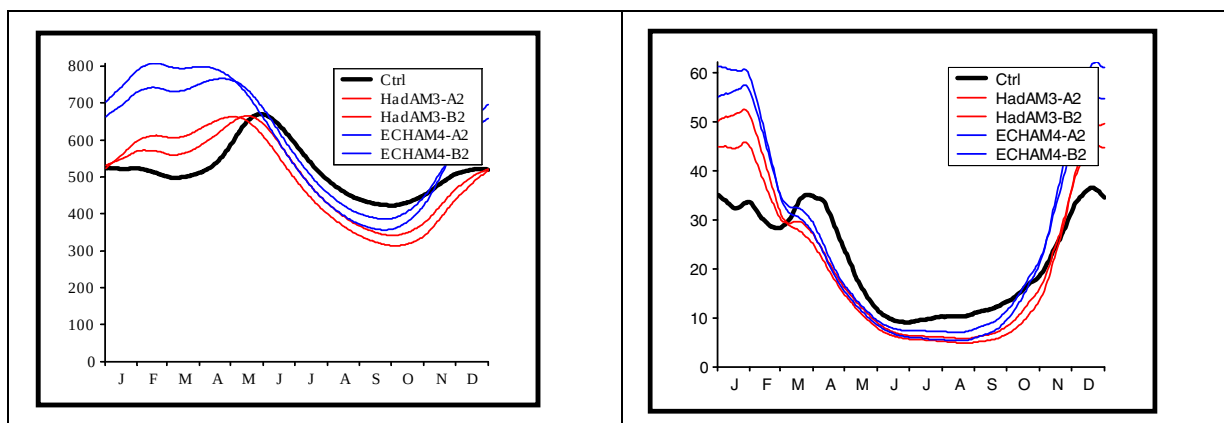


Figur 6-1. Beräknad förändring av medeltemperatur och nederbörd år 2100 jämfört med år 1961–1990 enligt de beräkningar som utförts vid SMHI Rossby Centre ([www.smhi.se](http://www.smhi.se), 2005).

#### Västra Sverige

Nederbörden antas öka med 20–30 %. Havsytan och vattennivån i kustnära ytvatten antas öka 20–40 cm för västkusten ner till Skåne och upp till 40–60 cm för Skånes västkust (SEAREG, 2003). Grundvattennivån i känsliga delar antas stiga med upp till ca 1 meter, vilket innebär att avståndet mellan markytan och grundvattennivån minskar. Enligt SMHI:s Sverigemodell väntas vattenföringstoppen tidigareläggas, från mars/april till januari/februari, och mängden vatten som tillrinner vid denna topp väntas öka (**Figur 6-2**). Likaså väntas vattenföringen under hösten öka, medan den väntas minska under sommaren. I slutet av perioden 2071–2100 antas årsmedeltemperaturen vara höjd med 4 °C (5 °C på vintern och 3 °C på sommaren, se **Figur 2-1 och 6-1**).

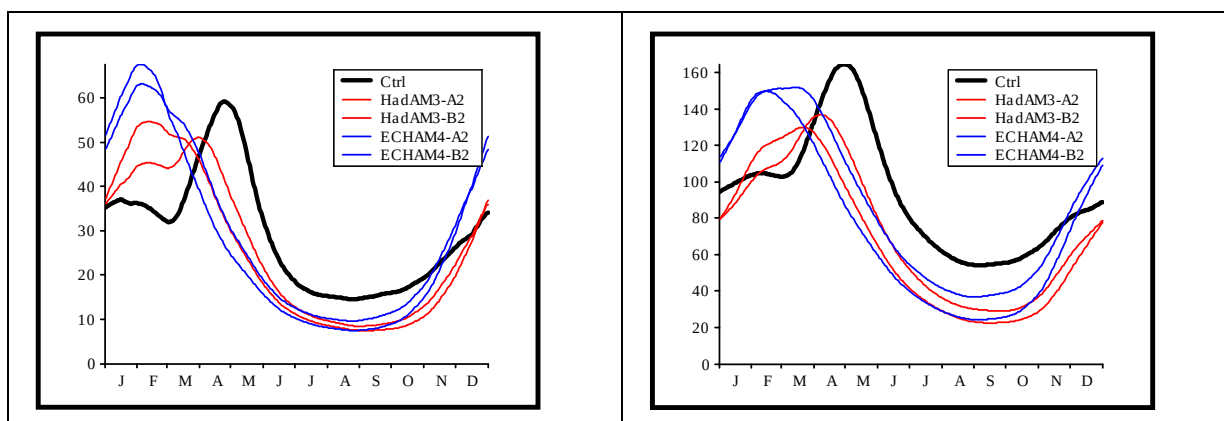




Figur 6-2. Förändring i medelvattenföring (mm/år) för Göta älv respektive Rönne å. Svart kurva visar årligt medelvattenföring för perioden 1961–1990 och övriga kurvor är resultaten av olika klimatscenarier för perioden 2071–2100 enligt den regionala klimatmodellen RCAO. (Räisänen et al, 2004).

### Sydöstra Sverige

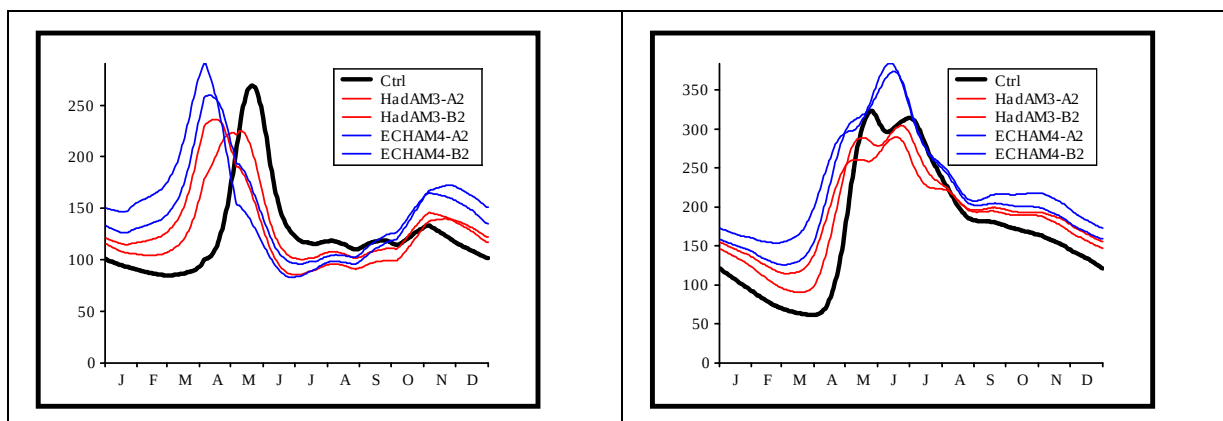
Nederbörden antas öka med 10–15 %. Havsytan och vattennivån i kustnära ytvatten antas öka 20–40 cm (SEAREG, 2003). Hur grundvattnet kommer att reagera (stigande eller sjunkande grundvattennivå) beror på förhållandet mellan nederbörd och avdunstning. En ökning i vattenföring antas bli större i Blekinge och minska mot Mälardalen längre norrut. Tillrinning antas inte öka lika mycket som för västra Sverige, däremot tidigare läggs vattenföringstopparna 1–2 månader under början av året (februari istället för mars, april) och en ökning kan komma i november och december månad (**Figur 6-3**). Temperaturen förutspås bli någon grad högre under vintern och våren än för västra Sverige.



Figur 6-3. Förändring i medelvattenföring (mm/år) för Emån respektive Motala ström. Svart kurva visar årligt medelvattenföring för perioden 1961–1990 och övriga kurvor är resultaten av olika klimatscenarier för perioden 2071–2100 enligt den regionala klimatmodellen RCAO. (Räisänen et al, 2004).

## Norra Sverige

Storleken på klimatförändringen i norra Sverige antas bli som för västra Sverige vad gäller nederbörd och temperatur. Dock förutspås landhöjningen (ca 8 mm/år) motverka höjning av havsnivån i Bottenhavet och Bottenviken och konsekvenser till följd av höjd havsnivå bör således utebli under denna 100-års period. Älvarnas vattenföringstoppas väntas öka men tidigareläggs inte på samma sätt som för västra och sydöstra Sverige (**Figur 6-4**). En förhöjd vintertemperatur kan komma att innebära att den mesta nederbörden kommer att falla som regn istället för snö. Detta kan ge längre tjälperioder med ökad sprickbildning i jorden som följd.



Figur 6-4. Förändring i medelvattenföring (mm/år) för Ångermanälven respektive Skellefteälven. Svart kurva visar årligt medelvattenföring för perioden 1961–1990 och övriga kurvor är resultaten av olika klimatscenarier för perioden 2071–2100 enligt den regionala klimatmodellen RCAO. (Räisänen et al, 2004).

Baserade på ovanstående klimatscenarier följer nedan beskrivningar och enkla beräkningar av eventuella effekter på förorenade områden intill ytvattendrag samt på gamla soptippar och moderna deponier.

## 6.2 Förorenade områden

För att exemplifiera hur de valda klimatscenarierna påverkar risken för mer omfattande föroreningsspridning från förorenade områden i olika delar av landet har enkla och generaliserande simuleringar utförts med hjälp av ParticleFlow (U.S. Geological Survey). ParticleFlow är inget omfattande modelleringsverktyg utan ett enkelt och översiktligt hjälpmedel för att demonstrera partikeltransport i två dimensioner i horisontalplanet. Simuleringen av föroreningsspridningen har gjorts genom så kallad partikelspårning och förutsätter:

- Fördelning i ett plan (en yta).
- Vattentroget ämne, det vill säga grundvattenflödet styr.
- Momentant utsläpp, det vill säga inget kontinuerligt utläckage till mark/grundvatten.
- Styrande transportmekanismerna utgörs enbart av advektion och hydraulisk dispersion.

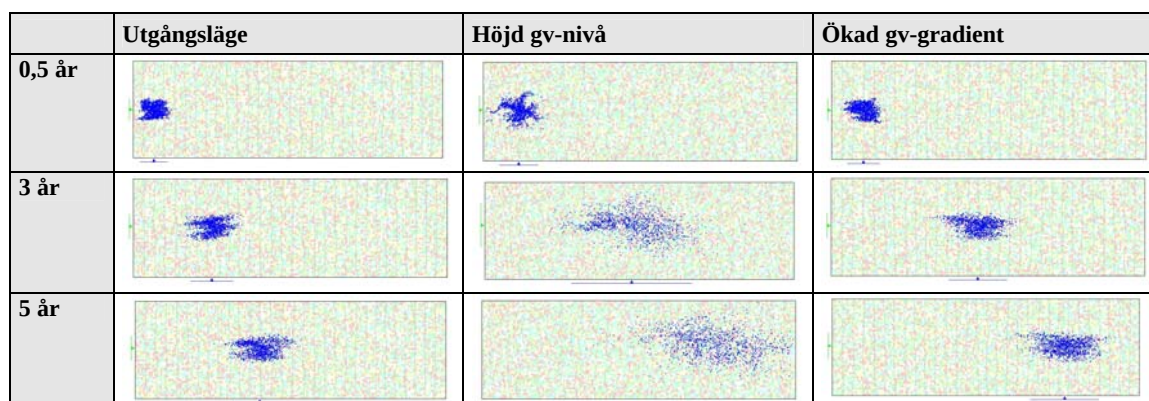
Som grund för simuleringarna har en typmiljö valts som mycket enkelt beskriver vanliga geologiska förhållande för förorenade områden enligt avsnitt 3.2 (finsediment, flack lutning). Förutsättningarna finns angivna i **Tabell 6-1**. Förändringar i föroreningsspridning baseras på förväntningar i ökad nederbörd enligt avsnitt 6.1 samt att detta kan leda till antingen ökad grundvattengradient och/eller höjning av grundvattennivån. För att enkelt illustrera möjlig inverkan av förändrat klimat har följande beräkningar gjorts:

- Referensfall (idag), **Tabell 6-1**.
- Höjd grundvattennivå så att grundvattnet även ligger i fyllnadsmassorna.
- Ökad grundvattengradient till 2 % lutning.

Tabell 6-1. Ansatta parametrar för simulering av hur ökade nederbörd kan inverka på ett område förorenat av en vattentrogen förorening.

| Parametrar:                        | Typmiljö                                                                                                                                  |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geologi:                           | Fyllnadsmassor (heterogena) ovanpå naturlig jord (ganska homogen).                                                                        |
| Fyllnadsmassor:                    | Fem olika jordarter med varierande porositet (5–20 %) och hydrologisk konduktivitet ( $10^{-6}$ – $10^{-3}$ m/s), slumpmässig fördelning. |
| Naturlig jord:                     | Siltig sand, porositet varierar mellan 11–15 %, hydrologisk konduktivitet $(1-5) \cdot 10^{-5}$ m/s.                                      |
| Storlek på modellen:               | 250 × 800 m.                                                                                                                              |
| Storlek på det förorenade området: | 50 × 50 m.                                                                                                                                |
| Grundvattennivån:                  | I den naturliga jorden.                                                                                                                   |
| Grundvattengradient:               | 1 %.                                                                                                                                      |
| Förorening (vattentrogen):         | Förorening både i silt och i fyllnadsmassor. Källan är momentan.                                                                          |

Resultaten av simuleringarna, det vill säga simulering av utgångsläge, höjd grundvattennivå samt ökad grundvattengradient, visas i **Figur 6-5**. Visualisering av utgångsläget blev det samma för de två typfallen. De svarta prickarna i diagrammen skall illustrera mängden förorening (beskrivet som ett antal partiklar) och ju svartare (ju tätare mellan prickarna) desto högre är koncentrationen.



Figur 6-5. Resultat av simuleringar utifrån antagna förändringar samt inparametrar angivna i Tabell 6-1.

#### **Prognos vid ökad nederbörd – höjd grundvattennivå:**

Grundvatten stiger varpå förorening som finns i fyllnadsmassor mobiliseras. En ökning i grundvattennivån resulterar i att en större mängd förorening kommer i kontakt med grundvattnet och mobiliseras. Detta medför att utbredningen av förorening kommer att öka markant. Koncentrationsmässigt medför en ökad mängd vatten att koncentrationen späds ut och koncentrationen skulle därmed kunna minska. Transporten kommer att ske mestadels i fyllnadsmassor.

#### **Prognos vid ökad nederbörd – ökad grundvattengradient:**

En ökning av grundvattengradienten från 1 % till 2 % medför att föroreningens transporthastighet ökar och i föreliggande fall fördubblas den jämfört med utgångsläget.

I ovanstående enkla simuleringar har bland annat ingen hänsyn tagits till en eventuell ökad utlakning av förorening till följd av ökad infiltration och perkolation av regnvatten.

### **6.3 Gamla soptippar och moderna deponier – effekter av klimatscenarierna**

För att exemplifiera hur förändrat klimat kan påverka föroreningsspridning från gamla soptippar och moderna deponier i olika delar av landet, har förändringar i mängden lakvatten som kommer att bildas beräknats. För att beräkna mängden lakvatten från en deponi upprättas en vattenbalans där vattenflöden in i, ut ur och på ytan av en deponi uppskattas.

Vattenbalansberäkningar har utförts med modellen Visual HELP (V-HELP, The Hydrological Evaluation of Landfill Performance). V-HELP är en hydrologisk modell för beräkning av vattenbalansen vid en deponi. Modellen har utvecklats av the U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station i samarbete med the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), (Schroeder et al., 1994). Deponikonstruktioner med olika kombinationer av vegetation, jordtäckning, avfallsmaterial, lateral dränering, lågpermeabla barriärer av naturliga och konstgjorda material kan simuleras. Modellen gör uppskattningar av dagliga, månatliga och årliga värden på ytavrinning, avdunstning, dränering och lakvattenproduktion, som resulterar från en vald deponikonstruktion. Modellen kan användas för såväl aktiva som helt avslutade deponier.

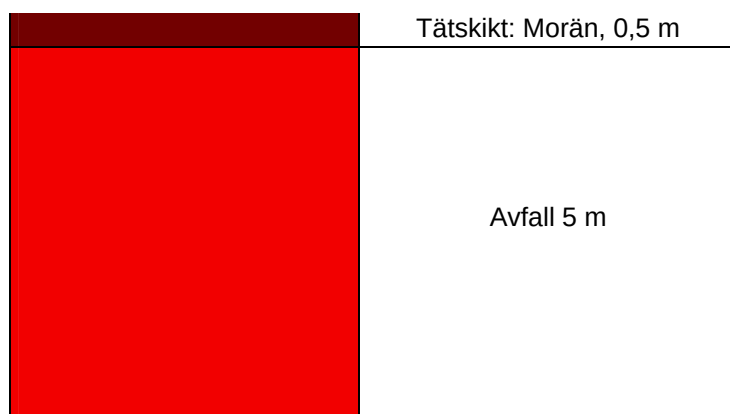
V-HELP används huvudsakligen av konstruktörer och beslutsfattare och det huvudsakliga användningsområdet för modellen är vid jämförelse av vattenbalansen för olika konstruktionsalternativ för nya deponier samt för utvärdering av befintliga deponier. Modellen tar hänsyn till en mängd konstruktionsparametrarna, som till exempel vegetation, jordmaterial samt olika konstgjorda material för täckning och botten tätning av en deponi. De olika jordlagrens mäktighet och släntlutning kan hanteras. Likaså kan olika climateffekter simuleras.

Indata till modellen består av materialdata (till exempel porositet, fältkapacitet, vissningspunkt, fukthalt och mättad hydraulisk konduktivitet) samt klimatdata. Modellen tar hänsyn till effekter av ytavrinning, infiltration avdunstning (evapotranspiration), vegetation, lakvattenåterföring, vertikalt omättat flöde och lakvattenproduktion. Modellen är väl accepterad runtom i världen och används i många olika situationer.

Vid modellberäkningarna har den globala klimatdatabas som finns kopplad till V-HELP utnyttjats (WHI Weather generator) för att generera klimatdata till modellberäkningarna. Databasen innehåller över 3000 väderstationer över hela världen med historiska klimatdata för varje station och den kan generera klimatdata för en period upp till 100 år. I databasen finns klimatdata i form av månadsmedelvärde för nederbörd och temperatur för varje station. Temperaturdata används för att uppskatta evapotranspiration. Klimatdata som genereras med hjälp WHI Weather generator går att variera, vilket innebär att olika klimatscenarier lätt kan genereras och sedan användas för vattenbalanssimuleringar i V-HELP. Denna möjlighet har utnyttjats vid uppskattning av förändringar i deponiers miljöpåverkan till följd av framtida klimatförändringar.

### 6.3.1 Beräkning av lakvattenbildning från gamla soptippar

Syftet med beräkning av lakvattenbildning från gamla soptippar är att visa hur en framtida klimatförändring kan påverka lakvattenbildningen och hur därmed risken för påverkan på omgivande naturresurser, som till exempel yt- och grundvatten, kan förändras. För att uppskatta hur framtida klimatförändringar kan påverka föroreningsituationen vid gamla soptippar har ett typfall av en gammal soptipp valts och V-HELP-beräkningar har utförts för tre olika delar av landet; västra, sydöstra och norra Sverige. Typfallet är baserat på en vanligt förekommande konstruktion för gamla soptippar där ett fem meter mäktigt avfallslager är sluttäckt med ett 0,5 meter tjockt moränlager (se **Figur 6-6**). Vid beräkningarna valdes en 50 meter lång slänt med en lutning på 6° (lutning 1:10). Markytan på deponin antogs vara vegeterad och modellsimuleringen gjordes för en period av ett hundra år.



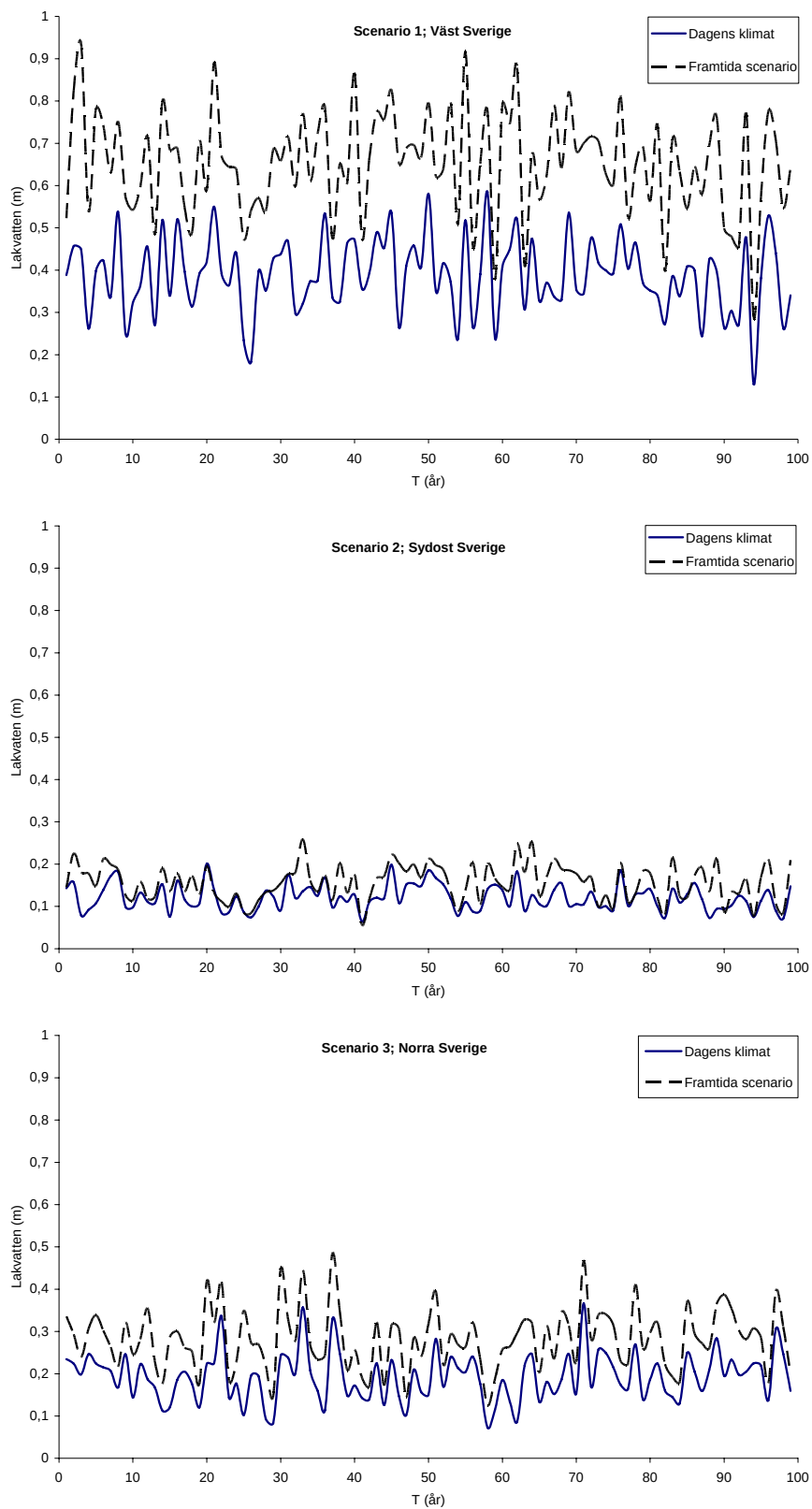
Figur 6-6. Principskiss av den konstruktion som exemplifierar ett typfall för en gammal soptipp vid V-HELP beräkningarna.

I **Tabell 6-2** och **Figur 6-7** visas resultaten av modellberäkningar för typfallet för gamla soptippar med V-HELP. I **Figur 6-7** visas den modellerade årliga lakvattenbildningen för de tre klimatscenerierna och i **Tabell 6-2** visas årsmedelvärde för beräknad lakvattenbildningen och evapotranspirationen (avdunstningen) från deponin.

Tabell 6-2. Resultat av modellberäkningar för gamla soptippar.

|                              | Simulerad temperaturförändring | Simulerad nederbördsförändring | Årsmedelvärde (mm) |         |                    |         |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
|                              |                                |                                | Lakvattenbildning  |         | Evapotranspiration |         |
|                              |                                |                                | Nu                 | Framtid | Nu                 | Framtid |
| Scenario 1; Västra Sverige   | 5 °C                           | 25 %                           | 390                | 650     | 440                | 590     |
| Scenario 2; Sydöstra Sverige | 6 °C                           | 12, 5%                         | 120                | 150     | 360                | 460     |
| Scenario 3; Norra Sverige    | 5 °C                           | 25 %                           | 190                | 280     | 290                | 380     |

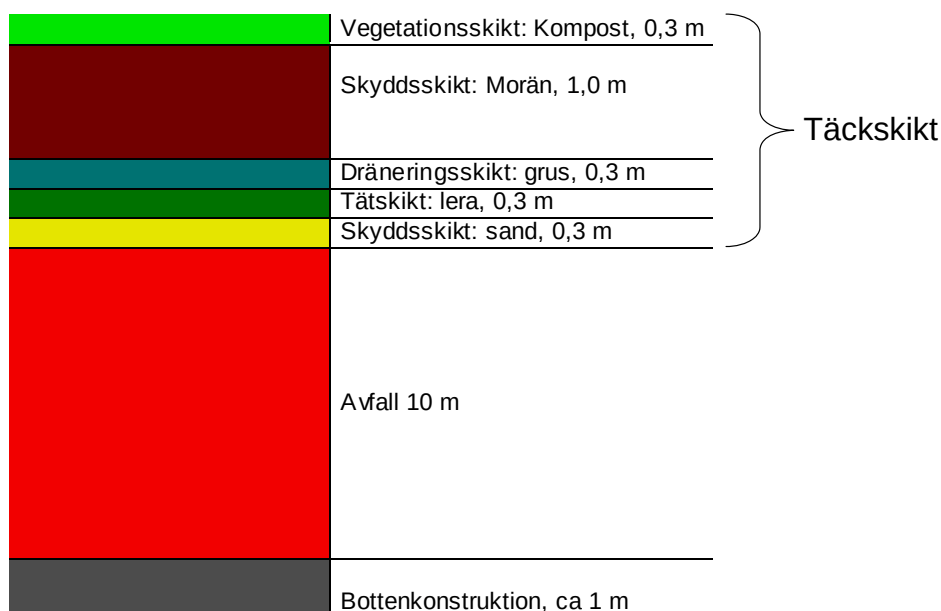
Generellt kan det konstateras att den högre nederbörden i väst Sverige resulterar i den största lakvattenbildningen, med störst variation mellan olika år (se översta diagrammet i **Figur 6-7**). På samma sätt kan det konstateras att den låga nederbörden i sydöstra Sverige resulterar i den lägsta lakvattenbildningen. Av **Tabell 6-2** och **Figur 6-7** framgår det att lakvattenbildningen ökar avsevärt i västra Sverige. Modelleringen visar att ökningen i västra Sverige är i storleksordningen 250 mm per år. I norra Sverige visar modelleringen en mindre ökning, med ca 100 mm, medan en liten ökning på ca 30 mm visas i sydöstra Sverige. Alla tre scenarierna visar att evapotranspirationen kommer att öka markant. Störst är ökningen i väst Sverige med 150 mm, medan den i de båda andra fallen är 100 mm. Den högre evapotranspirationen kan förklaras som en samverkan mellan ökad nederbörd och ökad lufttemperatur. Den ökade nederbörden leder till en högre fukthalt i marken som i kombination med den förhöjda lufttemperatur bidrar till en ökad evapotranspiration. Vid modellering av evapotranspiration har det inte tagits hänsyn till förändringar i vindstyrka. En ökad vindstyrka kommer att ytterligare öka evapotranspirationen från mark, eller som i detta fall, från deponiers sluttäckning.



Figur 6-7. Mängd lakvatten som genereras från gamla soptippar i dagens klimat (heldragen linje) och i framtida scenarier (streckad linje).

### 6.3.2 Beräkning av perkolation genom sluttäckning för moderna deponier

Syftet med att utföra en beräkning av perkolation genom sluttäckning för moderna deponier är att visa hur framtida klimatförändringar kan påverka perkolationen genom sluttäckningar, vilket kan resultera i en ökad lakvattenbildning som i sin tur dels medför en ökad risk för negativ påverkan på omgivande naturresurser, som yt- och grundvatten, och dels kan komma att ställa högre krav på framtida omhändertagande av uppsamlat lakvatten (till följd av större lakvatten-volymer). För att uppskatta hur framtida klimatförändringar kan påverka lakvattenbildningen vid moderna deponier har ett typfall av sluttäckning för en modern deponi valts. Typfallet valdes så att de idag gällande kraven på sluttäckning avseende tillåten mängdvatten som får perkolera genom täcksiktet för en icke farligt avfall deponi är uppfyllda. **Figur 6-8** visar sluttäckningen som består av ett tätskikt av lera som underlagras av ett skyddsskikt av sand. Ovanför tätskiktet finns ett dräneringslager av sand som överlagras av ett en meter mäktigt skyddsskikt av morän. Överst finns ett 0,3 meter tjockt vegetationsskikt av kompostmaterial. Vid beräkningarna valdes en 50 meter lång slänt med en lutning på 6° (lutning 1:10). Markytan på deponin antogs vara vegeterad och modellsimuleringen gjordes för ett hundra år.



Figur 6-8. Principskiss av konstruktion som exemplifierar ett typfall för en modern deponi.

I **Tabell 6-3** och **Figur 6-9** visas resultaten av modellberäkningar för typfallet för moderna deponier med V-HELP. I **Figur 6-9** visas den modellerade årliga perkolationen genom täcksiktet för de tre scenarierna och i **Tabell 6-3** visas årsmedelvärde för perkolationen genom täcksiktet och evapotranspiration från sluttäckningen.

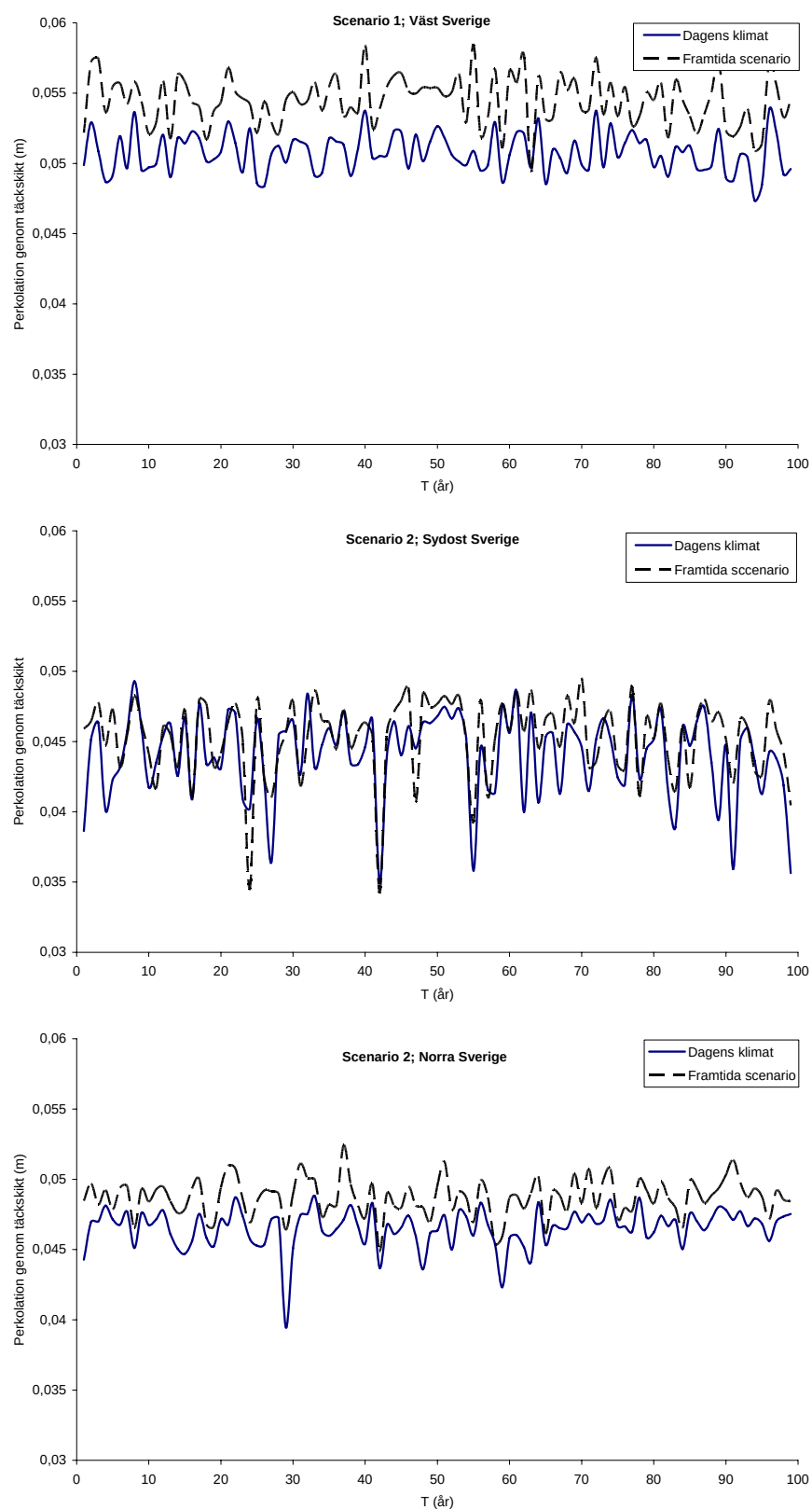
Tabell 6-3. Resultat av modellberäkningar för moderna deponier.

|                              | Simulerad temperaturförändring | Simulerad nederbördsförändring | Årsmedelvärde (mm)         |         |                    |         |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------|--------------------|---------|
|                              |                                |                                | Perkolation genom täcksikt |         | Evapotranspiration |         |
|                              |                                |                                | Nu                         | Framtid | Nu                 | Framtid |
| Scenario 1; Västra Sverige   | 5°C                            | 25%                            | 50                         | 55      | 440                | 600     |
| Scenario 2; Sydöstra Sverige | 6°C                            | 12,5 %                         | 44                         | 45      | 360                | 460     |
| Scenario 3; Norra Sverige    | 5°C                            | 25 %                           | 45                         | 50      | 300                | 370     |

Generellt kan det konstateras att den högre nederbörden i Västsverige resulterar i den största mängden vatten som perkolerar genom täckskiktet (se översta diagrammet i **Figur 6-9**). Modellberäkningarna visar endast obetydliga skillnader i perkolation genom täckskikt för sydöstra Sverige (1 mm, från 44 till 45 mm; **Tabell 6-3**) medan de för norra Sverige är i samma storleksordning som för sydvästra Sverige (5 mm; **Tabell 6-3**). Av **Tabell 6-3** och **Figur 6-9** framgår det att perkolationen genom täckskiktet ökar i västra Sverige och i Norrland (**Tabell 6-3**; skillnaden 5 mm), medan skillnaden i sydöstra Sverige anses vara försumbar (**Tabell 6-3**; skillnaden 1 mm).

Enligt kraven i deponiförordningen (2001:512) får perkolationen av regnvatten genom täckskiktet på en deponi för icke farligt avfall inte överstiga 50 mm per år. Vid beräkningar i V-HELP valdes ett typfall som i det minst gynnsamma fallet (västra Sverige, scenario 1) nått och jämt klarade detta krav. Av beräkningsresultaten framgår det att det finns en risk att framtida klimatförändringar kan medföra att dagens hydrauliska krav på sluttäckningar inte uppfylls. Enligt beräkningarna kommer evapotranspirationen från en modern deponi att öka med mellan 70 och 160 mm/år beroende på var den ligger i landet, med den största ökningen i västra Sverige och den lägsta i norra delarna av landet (**Tabell 6-3**). Den ökade evapotranspirationen kan förklaras som en samverkan mellan ökad nederbörd och ökad lufttemperatur. Den ökade nederbörden leder till en högre fukthalt i marken som i kombination med den förhöjda lufttemperatur bidrar till en ökad evapotranspiration. Vid modellering av evapotranspiration har det inte tagits hänsyn till förändringar i vindstyrka. En ökad vindstyrka kommer att ytterligare öka evapotranspirationen från mark, eller som i detta fall från deponiers sluttäckning.





Figur 6-9. Mängdvatten som perkolerar genom sluttäckning från moderna deponier i dagens klimat (heldragen linje) och i framtida scenarier (streckad linje).

## 7 DISKUSSION

### 7.1 Förändrade miljörisker från förorenade områden

Vädret är i ständig förändring och vi har av de senaste årens perioder med intensiva/långvariga regn sett hur det har drabbat vårt samhälle i form av översvämningar. I början av året 2005 drabbades Sverige också av en häftig orkan med förödande konsekvenser. När ett häftigt eller långvarigt regn leder till att bebyggda områden översvämmas, när stormar leder till människor skadas, eller om det föreligger risker för ras och skred, handlar det alltid om att i första hand att rädda liv. Det är därför självklart att miljön i ett sådana lägen kommer i andra hand. Resultaten av de beräknade klimatscenarierna, utförda vid SMHI:s Rossby Centre, tyder på en ökad nederbördsmängd, en stigande havsvattennivå och kanske även ökade vindstyrkor. En ökning av frekvensen naturolyckor (översvämning, skred och ras, orkaner) bedöms härav som sannolik. Detta kommer att inverka på vårt samhälle, vilket inte existerande metoder för riskbedömning/riskanalys eller nuvarande bedömningsgrunder tar hänsyn till. En av dessa risker som inte beaktats är inverkan av förändrade förhållande för förorenings-spridning i mark samt att omgivningens känslighet och skyddsvärde kan komma att förändras.

För många föroreningar i marken är tillgången och flödet av vatten den främsta förutsättningen för mobilisering och spridning av dessa ämnen. Resultaten av de enkla simuleringar som utfördes inom uppdraget visar att en stigande grundvattennivå ökar mobilisering av förorening (vattentrogen) och spridningen i horisontalplanet genom att en större mängd förorening blir tillgängligt för vatten och transport med detta. Koncentrationen kommer dock att påverkas av den utspädning som en större mängd vatten innebär. Resultaten visar också att en höjning av gradienten tydligt inverkar på transporthastigheten. Höjd grundvattennivå, ökad grundvattengradient, ökad ytavrinning, ökad infiltration och perkolation av regnvatten, ökade och/eller kraftigare flöden i vattendrag med flera, som möjliga konsekvenser av ökad nederbörd och höjd havsvattennivå, kan i flera områden komma att gynna mobilisering och spridning av föroreningar. Konsekvenserna kan bli (ökad) påverkan på ekomiljön i ytvattendraget, driftstörningar i reningsverk i de fall där ytvattnet utgör vattentäkt, förstörda badvatten etc.

Låglänta områden längs älvar och vattendrag kommer vid höga flöden att ställas under vatten. Likaså kan låglänta kust- och sjöområden vid höga vattenstånd i kombination med kraftig pålandsvind översvämmas. Förorenade områden intill ytvattendrag kan därmed komma att ställas helt under vatten. En motverkande faktor till negativa konsekvenser p.g.a. ökad mobilisering och spridning kan vara utspädning till följd av mer tillgång på vatten. En annan motverkande faktor till översvämningar är den landhöjning som är tydlig längs norrlandskusten. För reglerade vattendrag kan dock besvärliga situationer uppstå vid särskilt stora tillrinningar i kombination med fyllda vattenmagasin, eftersom det då inte längre finns någon utjämnande förmåga. Med ökande nederbörd kan sådana tillfällen antas bli mer vanligt förekommande om inte dammarnas kapacitet höjs. De oregerade vattendragen påverkas direkt vid stor tillrinning. Risk för höga flöden eller vattennivåer på en plats kan stå i konflikt med risker på annan plats. Som exempel kan nämnas Vänerns vattenreglering, där riskerna för skred i Göta älvdalen måste vägas mot konsekvenserna av höga vattennivåer längs Vänerns stränder.

Förhöjd nederbörd, och inte minst kraftigare regnintensiteter, kommer att leda till kraftigare ytavrinning. Föregås nederbörden av långvarig torka kan detta leda till kraftigare erosion, vilket frigör ytliga föroreningar. Detta skulle också kunna innebära risk för slamströmmar som i så fall skulle kunna frigöra än mer föroreningar. Erosion, skred, ras, sättningar är andra faktorer som inverkar på mobilisering och spridning av förorenande ämnen i mark. Nederbördens intensitet påverkar den ytliga erosionen i slänter. Flödesintensitet och turbulens i vattendrag påverkar erosionen av undervattensslänter och slänter i strandlinjen. Erosion av slänter påverkar i sin tur släntens stabilitet. Om enbart grundvattennivån ökar (till exempel kortare häftigt regn eller att vattnet i ett vattendrag sjunkigt undan men grundvattennivån i jorden fortfarande är hög) kan säkerheten mot släntbrott (så kallad säkerhetsfaktor) minska markant (Hultén et al., 2005). Ökad

risk för skred föreligger således. Vid häftiga regn och/eller ökad strömning ökar också risken för erosion i släntfoten, vilket också skulle kunna minska säkerhetsfaktorn. Är marken intill vattendraget förorenad (på grund av gammal verksamhet, pågående industriverksamhet, infrastruktur etc.) finns risk att förorenade jordmassor eroderar, rasar eller skredar ut i vattendraget. Skred eller ras av större dignitet kan orsaka dämning och därmed översvämning av intilliggande förorenade områden. Vi är idag ganska förskonade från naturolyckor i Sverige, men det finns en risk att detta kommer att öka i framtiden och det måste vi redan nu ha i åtanke.

Det samhällsproblem som förorenade markområden idag utgör kan komma att bli större i framtiden. Hänsyn till klimatförändringar bör redan nu tas i riskhanteringen av dessa områden, inte bara för att förebygga inför framtida klimat utan att också för att klara extremvädersituationer redan idag. Hänsyn till klimatförändringar måste också redan nu tas vid nyetablering av miljöstörande verksamhet så att dessa inte anläggs i områden känsliga för förändringar i vattenflöden.

## 7.2 Förändrade miljörisker från gamla soptippar och moderna deponier

Deponier i Sverige har, i denna studie, delats in i två kategorier (gamla soptippar och moderna deponier). De gamla soptipparna karakteriseras av att de ofta är lokaliserade utan någon tanke på riskerna för föroreningsspridning medan moderna deponier har lokaliserats på platser med goda förutsättningar för minimal påverkan på närliggande miljö, som till exempel mark och yt- och grundvatten. Idag förses dessutom de moderna deponierna med tekniska konstruktioner som ytterligare skall minimera risken för föroreningsspridning. Exempel på tekniska konstruktioner är botten tätning, sluttäckning, uppsamlingssystem för förorenat vatten (så kallat lakvatten) och gas.

För att exemplifiera hur de valda klimatscenarierna påverkar risken för mer omfattande föroreningsspridning från gamla soptippar och moderna deponier i olika delar av landet, har beräkningar med vattenbalansmodellen Visual HELP (V-HELP) utförts. Syftet med beräkningarna för de gamla deponierna var att kvantifiera ökningen av lakvattenvolymen, och därmed föroreningspotentialen, till följd av framtida klimatförändringar. Syftet med beräkningarna för moderna deponier var att visa hur en ökad nederbörd kan resultera i en ökad lakvattenbildning till följd av en ökad infiltration genom sluttäckningen. En ökad lakvattenbildning kan i sin tur dels medföra en ökad risk för negativ påverkan på omgivande naturresurser, som yt- och grundvatten, och dels innebära högre krav på framtida system för omhändertagande av uppsamlat lakvatten. Vid beräkningarna valdes ett typfall för gammal soptipp respektive modern deponi och modellberäkningar genomfördes för tre regioner i landet, västra, sydöstra, och norra Sverige. Typfallet för den moderna deponin valdes så att de idag gällande kraven på sluttäckning avseende tillåten mängdvatten som får perkolera genom täckskiktet för en icke farligt avfall deponi är uppfyllda.

Dagens deponier dimensioneras för att klara de krav på mängden vatten som får perkolera genom en sluttäckning som definieras i lagstiftningen på Europeisk nivå och nationellt. Lagstiftningen syftar också till att vara långsiktigt hållbar och reglerna är avsedda att sörja för en god miljö under lång tid (flera hundra år). Samtidigt försöker deponiägarna ofta att minimera materialmängderna vid sluttäckning av ekonomiska skäl, vilket leder till en minsta möjliga skikt-tjocklek på de olika ingående skikten i en deponis sluttäckning. Modellberäkningarna med V-HELP, som redovisas i denna rapport, visar att deponier som idag uppfyller de hydrauliska kraven enligt gällande regelverk sannolikt inte kommer att uppfylla kraven i framtiden. Resultaten visar således att det i framtiden kan komma att krävas att ett stort antal deponis sluttäckningar görs om med stora kostnader som följd, eller att gällande lagstiftning måste omprövas.

För en gammal soptipp, enligt typfall beskrivit ovan och belägen i västra Sverige, visade modellberäkningarna att den årliga lakvattenbildningen kommer att öka med ca 250 mm/år, vilket motsvarar en ökning med 25 000 m<sup>3</sup> (> 60 %) för en deponi med en area som är 10 hektar (ha). På samma sätt kan det konstateras att en modern deponi enligt typfallet och belägen i västra

eller norra Sverige kommer att producera en större lakvattenmängd som motsvarar ett årsmedelvärde på 5 mm. För en deponi med arean 10 ha motsvarar det en årlig ökningen av lakvattenvolymen från 5 000 till 5 500 m<sup>3</sup> per år (10 %).

Stigande grundvattennivåer och kraftigare grundvattenfluktuationer kommer att leda till att mer avfall i gamla soptippar kommer att exponeras för grundvatten säsongvis, vilket i sin tur leder till att föroreningar lakas ur avfallet snabbare. Ytterligare konsekvenser av de kraftigare grundvattenfluktuationerna är att nedbrytningshastigheten av organiskt avfall kommer att öka. Därmed ökar gasbildning och risken för läckage av växthusgaserna metan och koldioxid till atmosfären. Detta gäller framförallt för soptippar och deponier som saknar uppsamlingssystem för gas. En snabbare nedbrytning av avfallet leder också till snabbare och kraftigare sättningar i avfallet vilket kan försämra sluttäckningens funktion. Tjältningsprocesserna kommer sannolikt också att påverkas, bland annat till följd av ett tunnare snötäcke. För moderna deponier kan det medföra att viktiga funktioner i delar av sluttäckningen påverkas, till exempel kan ett lerlager förlora sin tätande funktion.

## 8 SLUTSATSER

Föreliggande rapport visar att förorenings-spridning från förorenade områden nära ytvattendrag och från soptippar och deponier, sannolikt kommer att förändras avsevärt till följd av framtida klimatförändringar. De mest troliga och betydelsefulla förändringarna är:

### Förorenade områden

- Förhöjda grundvattennivåer kan medföra att större volymer förorenad jord kommer att exponeras för grundvatten, vilket innebär risk för ökad utlakning till grundvattnet och spridning med detta. En höjning av grundvattennivån till en tidigare uttorkad jord eller till ett fyllnadslager kommer medföra ökad spridningshastighet och ökad utspädning av föroreningar som följer grundvattenströmningen till följd av att dessa geologiska matriser ofta har en högre genomsläpplighet än jordmatrisen i den mättade zonen.
- Snabbare grundvattenflöde till följd av förhöjda grundvattennivåer kan medföra ökad spridningshastighet och ökad utspädning av föroreningar som följer grundvattenströmningen.
- Snabbare utlakning av föroreningar till följd av kraftigare säsongsvariationer i grundvattennivåer.
- Förändrad ytavrinning till följd av högre regnintensitet, speciellt efter längre torrperioder där en ökning av den ytliga erosionen också medför ökad spridning av ytliga föroreningar. Risk kan finnas för bildandet av slamströmmar där stora förorenade jordvolymer kan komma att beröras.
- Högre sommartemperatur ökar risken för torrsprickor i kohesionsjordar vilket leder till snabbare vattenflöde genom den omättade zonen. Detta medför ökad transport av föroreningar genom den omättade zonen ner till grundvattnet i den mättade zonen.
- Förändrade betingelser för tjälbildning, till exempel mindre snödjup, kan påverka förorenings-spridningen genom ökad uppspräckning av jorden. *Konsekvenserna blir då samma som för punkten ovan.*

Hur förändrade biotoper kan förväntas påverka förorenings-spridning, direkt och indirekt, behöver studeras innan slutsatser kan dras.

### Soptippar och deponier

- Beräkningsresultaten i föreliggande rapport visar att framtida klimatförändringar kommer att medföra att större volymer lakvatten kommer att genereras från gamla soptippar och att det finns en risk att dagens hydrauliska krav på sluttäckningar inte uppfylls.
- I gamla soptippar kommer större mängder föroreningar att lakas ut till följd kraftigare grundvattenfluktuationer i kombination med högre grundvattennivåer.
- Högre infiltration genom täcksikt ger högre fukthalt i avfallet vilket leder till en snabbare nedbrytning av avfallet och därmed större gasproduktion och snabbare och kraftigare sättningar.
- Vid moderna deponier kommer större volymer lakvatten att genereras vilket innebär att det finns en risk att befintliga system för uppsamling och rening av lakvatten kommer att vara underdimensionerade.
- Kraftigare gasbildning till följd av förhöjd fukthalt i avfallet, p.g.a. högre infiltration, kan innebära att befintliga system för uppsamling och kvittblivning kommer att vara underdimensionerade.
- I vissa regioner kommer finnas det risk för mer omfattande tjälskador på deponiers sluttäckningar.
- Högre regnintensiteter kommer att leda till kraftigare erosion, vilket kan skada deponiers sluttäckningar och deras funktion.
- Ett förändrat klimat leder till att nya arter etablerar sig på deponiers sluttäckning, vilket kan påverka både avdunstningen från sluttäckningen och skador på sluttäckningen till följd av rotnedträngning.

## 9 FOU-BEHOV

Under de senaste 15–20 åren har omfattande nationell och internationell forskning som rör föroreningsspredning från förorenade områden och deponier utförts. Forskning inom området, som mer specifikt berör de under senare år mer och mer uppmärksammade framtida klimatförändringar, saknas dock. Nedan beskrivs mycket kortfattat de områden som anses vara mest relevanta att prioritera ur detta perspektiv. Det råder ingen inbördes prioritering mellan punkterna.

- Utreda hur förändrade yt- och grundvattenflöden kommer att inverka på föroreningspredningen (transporthastigheter, utspädning etc.). Exempelvis baseras dagens riskbedömningar på rådande hydrologiska och geohydrologiska förhållanden, men det är osäkert huruvida riskbilden kan komma att påverkas till följd av ett förändrat klimat.
- Utreda hur förändringar i grundvattennivåer kan komma att inverka på riskbilden i vissa regioner. Föroreningar som nu ligger över grundvattennivån och inte är tillgänglig för utlakning via grundvattnet kan i framtiden komma att exponeras för grundvattnet.
- Följa upp grundvattennivåer i olika delar av landet för att se hur stora regionala variationer som kan förväntas.
- Försöka klargöra inverkan på hälso- och miljökonsekvenser, i samband med förorenad jord, till följd av förändrade flödens och temperaturers inverkan på föroreningssituationen.
- Utveckla modeller för föroreningspredning som kan hantera effekter av klimatförändringar, som till exempel mer uttalade klimatextremer, fluktuerande grundvattennivåer, heterogeniteter i mark.
- Utveckla modeller som kopplar ihop geohydrologiska transporter med geokemiska processer.
- Ta fram kunskap om vegetationsförändringars effekter på markprocesser. Likaså finns ett behov att undersöka förändringar i mikrofloran. De processer som sker i marken har betydelse på en förorenings fördelning i marken.
- Ta fram kunskap om torrperioders inverkan på föroreningssituationen i mark.
- Undersöka påverkan på deponiers sluttäckning med avseende på förändring av nederbörd, förändrade tjälförhållanden och förändrad vegetation.
- Bättre förståelse av de processer som styr utlakning av föroreningar och gasbildning i deponier och som påverkas av ändrade fuktförhållanden (högre infiltration och förhöjda grundvattennivåer) i avfallet.
- Fördjupade hydrauliska studier för att utröna klimatförändringarnas inverkan både på deponiers vattenbalanser och vattenbalans i ett förorenat markområde.
- Utreda behov av nya dimensioneringskriterier för att säkerställa deponiers funktionskrav (t.ex. krav på tillåten infiltration genom sluttäckningar) enligt deponeringsdirektivet (99/31/EG) och påföljande svensk lagstiftning.
- Fördjupade kunskaper om de processer i avfallet i våra soptippar och deponier som är beroende av fukthalt, till exempel gasbildning och utlakning av föroreningar.
- Fördjupad kunskap om påverkan på deponiers sluttäckning till följd av ett ändrat klimat, till exempel förändrad vegetation, kraftigare tjälning och kraftigare erosion.
- Existerande metoder för riskbedömning/riskanalys behöver ses över och anpassas att ta hänsyn till extrema vädersituationer.

## REFERENSER

- EEA (2004).** *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe*. Environmental issue report No 35, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- Fetter C.W. (2001).** *Applied hydrogeology*. Fourth Edition. ISBN 0-13-088239-9.
- Hadley Centre (2005).** Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK, [www.met-office.gov.uk/index.html](http://www.met-office.gov.uk/index.html)
- Handbok (2004:2).** *Deponering av avfall. Handbok med allmänna råd till förordningen (2001:512) om deponering av avfall och till 15 kap. 34 § miljöbalken (1998:808)*
- Hultén C., Olsson M., Rankka K., Svahn V., Odén K., Engdahl M. (2005).** *Släntstabilitet i jord- konsekvenser av ett förändrat klimat*. Delrapport inom uppdraget Jordskred och Ras i Klimatförändringens Spår. SGI Varia 560-1, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Kelly T.M., Winchester J.W. (2005).** *Can hazardous waste sites be breached as a result of future climate change?* Journal of environmental engineering, Technical notes, may 2005.
- IPCC (2001).** *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC WGII report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Knutsson G., Morfeldt C.O. (1995).** *Grundvatten, teori & tillämpning*. ISBN 91-7332-740-9.
- Naturvårdsverket (2004).** *Lägesrapport för efterbehandlingsverksamheten år 2004*. Lägesrapport, dnr 642-5586-04Rf, 2005-02-03.
- Naturvårdsverket (1995).** *Branschkartläggningen. En översiktlig kartläggning av efterbehandlingsbehovet i Sverige*. NV rapport 4393. ISBN 91-620-4393-5.
- NFS (2004:10).** *Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall*.
- Rankka K., Rydell B. (2005).** *Stranderosion och översvämningar - konsekvenser av ett förändrat klimat*. Delrapport inom uppdraget Jordskred och Ras i Klimatförändringens Spår. SGI Varia 560-2, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Rosqvist, H., and Berglund, S. (2004).** *Long term effects on soil covers: Effects of cyclic freezing – thawing, root penetration, soil erosion, and climate changes*. State-of-the-art-report. MiMi working report.
- RVF (2005).** *Svensk avfallshantering 2005*. Svenska Renhållningsverksföreningen, RVF.
- Räisänen et al. (2004).** European climate in the late twenty-first century: Regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. Climate Dynamics, 22: 13-31.
- SEAREG (2003).** Seareg 2<sup>nd</sup> progress report. Edited by Philipp Schmidt-Thomé. Prepared by Geological Survey of Finland (GTK), Centre for Urban and Regional Studies/Helsinki University of Technology (CURS/HUT), Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Regional Council of Itä-Uusimaa, University of Greifswald.
- Schroeder P.R., Dozier T.S., Zappi P.A., McEnroe, B.M., Sjoström, J.W., and Peyton, R.L. (1994).** *The Hydrological Evaluation of Landfill Performance (HELP) model: Engineering Documentation for Version 3*. EPA/600/R-94/168b, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- (SFS: 2001:512).** *Förordning om deponering av avfall*.
- SMHI (2005a).** Klimatscenarier från 2005, R&D, Rossby Centre, SMHI, [www.smhi.se/sgn0106/if/rc/clmscen05.htm](http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/clmscen05.htm)

**SMHI (2005b).** Klimatscenarier från 2005, R&D, Rossby Centre, SMHI,  
[www.smhi.se/sgn0106/klimat/klimscen.htm](http://www.smhi.se/sgn0106/klimat/klimscen.htm)

**WHO (2002).** *Floods: Climate change and adaptation strategies for human health.* Report on a WHO meeting, London, UK, 30 June-2 July 2002. EUR/02/5036813.

**Öman C., Malmberg, M., Wolf-Watz, C. (2000).** *Handbok för lakvattenbedömning metodik för karaktärisering av lakvatten från avfallsupplag*, RVF Rapport 00:7

**99/31/EG.** Rådets direktivet om deponering av avfall.

[www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se) (2005): Naturvårdsverket

[www.sgu.se](http://www.sgu.se) (2005): Sveriges geologiska undersökning. Grundvatten.

[web.utk.edu](http://web.utk.edu) (2005): University of Tennessee, Hydrogeology research program.

[www.grida.no](http://www.grida.no) (2005): United Nations Environment programme. Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.







Statens geotekniska institut  
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: [sgi@swedgeo.se](mailto:sgi@swedgeo.se) Internet: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)