



Klimatförändringens inverkan på risker vid förorenade områden

En förstudie

Pär-Erik Back, Michael Pettersson och Mats Fröberg

Uppdragsgivare: Statens geotekniska institut

mars 2025

Uppdragsledare: Michael Pettersson
Granskare: Sofie Hermansson
Handläggare: Pär-Erik Back och Mats Fröberg
Diariernr: 1.1-2002-0168
Uppdragsnr: 10005
Totalt antal sidor: 68

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:

Back, P-E., Pettersson, M. & Fröberg, M., 2024, Klimatförändringens inverkan på risker vid förorenade områden, En förstudie, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2025-03-13.

Foto på omslag: Adobe Stock

Förord

Föroreningar kan medföra risker för människors hälsa och vår miljö. Sverige har därför ställt upp miljö kvalitetsmål som anger inriktningen för miljöarbetet och fokuserar på att minska dessa risker. Det finns ett stort antal förorenade områden i landet. Utredningar av vilka risker ett förorenat område kan innebära för människors hälsa eller miljön, och att vid behov minska dessa risker genom efterbehandling, är en viktig del av miljömålsarbetet.

Statens geotekniska institut (SGI) har det nationella ansvaret för forskning, teknikutveckling och kunskapsuppbyggnad gällande förorenade områden. Syftet är att SGI ska medverka till att höja kunskapsnivån och öka saneringstakten så att miljö kvalitetsmålen nås. Som ett led i detta ingår att förmedla kunskap och ge stöd till olika intressenter, exempelvis tillsynsmyndigheter, konsulter, verksamhetsutövare och entreprenörer. Detta görs bland annat genom att ge ut vägledningar och andra publikationer.

Framtida förändringar i klimatet innebär att de risker som föroreningar i mark och vatten utgör kan komma att förändras. Det som bedöms vara relevanta utgångspunkter för en bedömning av risker vid dagens situation behöver alltså inte vara giltigt i ett förändrat klimat. Denna rapport har som syfte att identifiera olika aspekter av klimatförändringen som kan påverka riskerna vid förorenade områden. Rapporten vänder sig främst till tillsynsmyndigheter och konsulter som utreder risker med förorenade områden.

Uppdraget har i sin helhet genomförts av SGI. Projektgruppen har bestått av Michael Pettersson (uppdragsledare), Pär-Erik Back och Mats Fröberg (idag på Naturvårdsverket).

Michael Pettersson

Sofie Hermansson

Uppdragsledare

Granskare

Innehållsförteckning

Sammanfattning	6
1 Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Mål och syfte	7
1.3 Avgränsning	8
1.4 Nyttan och relevans för samhället	8
1.5 Läsanvisning	8
2 Klimatets förändring i Sverige	10
2.1 Inledning	10
2.2 Temperatur	12
2.3 Nederbörd	13
3 Klimatförändringens effekter	17
3.1 Metod för identifiering av effekter	17
3.2 Föroreningskälla	18
3.3 Föroreningstransport	24
3.4 Skyddsobjekt	32
4 Klimateffekter i avhjälpandeprocessen	45
4.1 Moment i processen	45
4.2 Övergripande åtgärds mål	45
4.3 Undersökningar	45
4.4 Riskbedömning	46
4.5 Åtgärdsutredning	46
4.6 Riskvärdering	47
4.7 Åtgärdernas genomförande	47
5 Slutsatser	48
6 Rekommendationer	50
Referenser	52

Bilaga

Erosion via ytavrinning

Sammanfattning

Idag finns en enighet om att vi står inför förändringar i klimatet i framtiden, såvida vi inte genomför drastiska förändringar i vårt sätt att leva. Konsekvenserna av ett förändrat klimat är av betydelse för den fysiska planeringen av hur vi nyttjar mark och vatten. Exempelvis kommer klimatförändringen att innebära konsekvenser för markens byggbarhet, men även de risker som föroreningar i mark och vatten ger upphov till kan komma att förändras.

De metoder för riskbedömning av förorenade områden som tillämpas idag beaktar inte klimatförändringens effekter fullt ut. Med anledning av detta har SGI genomfört en förstudie med fokus på hur ett förändrat klimat kan komma att inverka på de typer av risker som normalt beaktas vid riskbedömning av förorenade områden, alltså risker för människa och miljö. Även risker i andra skeden av avhjälpandeprocessen behandlas översiktligt. Målet med detta arbete är att skapa ett underlag, som tillsammans med andra arbeten, kan användas som utgångspunkt för att ta fram vägledningsmaterial och verktyg för bedömning av de effekter som klimatförändringen kan få på riskerna vid förorenade områden.

Den pågående klimatförändringen medför förändringar av temperatur, nederbörd, vattentillgång, vattennivåer med mera. Detta ger i sin tur upphov till förändringar i olika markprocesser, spridning och föroreningstransport samt risker för människor och miljö. Den främsta effekten av ett förändrat klimat bedöms vara att spridningen av föroreningar från förorenade områden kan komma att öka. De viktigaste källorna till detta är ökad utlakning till följd av ökad nederbörd samt erosion, främst via ökad ytavrinning. Även transporten av föroreningar via grundvatten bedöms kunna öka. De risker som människor utsätts för vid förorenade områden kan komma att förändras något, men antagligen i mindre omfattning. I vissa specifika fall kan klimatförändringen leda till att skyddsvärden i miljön förändras.

För att möjliggöra att klimateffekter ska kunna beaktas vid beräkning av riktvärden finns ett behov av att komplettera Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden med spridningsvägen erosion via ytavrinning. För att förtydliga de risker som ett förändrat klimat kan ha på sediment bör sediment lyftas fram som ett separat skyddsobjekt i modellen.

Klimatförändringen kan även påverka redan efterbehandlade områden där förorening har lämnats kvar, exempelvis genom erosion av täckskikt och barriärer. Därför kan det vara befogat med en översyn av detta. Slutligen konstaterar vi i rapporten att det behövs bättre vägledning om hur olika typer av risker vid förorenade områden bör hanteras i ett förändrat klimat.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det finns en enighet om att vi står inför förändringar i klimatet och att konsekvenserna av detta kommer att öka i framtiden, såvida vi inte genomför drastiska förändringar i vårt sätt att leva. Denna slutsats baseras på ett flertal oberoende klimatindikatorer såsom förändringar i temperaturen i atmosfären, mark och hav, utbredningen av glaciärer och förändrade havsnivåer. Konsekvenserna av ett förändrat klimat har betydelse för den fysiska planeringen av hur vi nyttjar mark och vatten. Exempelvis kommer klimatförändringen att innebära konsekvenser för markens byggbarhet och risken för naturolyckor, men även de risker som föroreningar i mark och vatten ger upphov till kan komma att förändras.

Det finns cirka 85 000 förorenade områden i Sverige som är eller misstänks vara förorenade med miljögifter (Naturvårdsverket, 2024d). Många av dessa områden kan utgöra en risk för människor eller för miljön. Förändringar i klimatet kan medföra att de risker som förorenade områden utgör förändras över tid. Exempelvis kan riklig nederbörd orsaka ras, skred, erosion och översvämning vid åtskilliga förorenade områden. Detta är särskilt påtagligt i områden som ligger i anslutning till vatten samt för förorenade sediment. Betydelsen av olika spridnings- och exponeringsvägar och de risker som ett förorenat område utgör för människor kan alltså komma att skilja sig från dagens situation. Effekten av klimatförändringen är därmed en aspekt som behöver beaktas då risker vid förorenade områden utreds. Nilsson et al. (2005) konstaterade redan för två decennier sedan att existerande metoder för riskbedömning av förorenade områden inte beaktar klimatförändringens effekter fullt ut. Man konstaterade att en risk som inte beaktas är klimatets inverkan på föroreningsspridning samt att omgivningens känslighet och skyddsvärde kan komma att förändras.

Det arbete som genomförts i denna förstudie kopplar till de mål som lyfts fram för SGI:s arbeten i handlingsplanen för hållbart markbyggande i ett förändrat klimat 2021–2025 (SGI, 2020) och till de arbeten som SGI har redovisat i Publikation 20 (Edebalk et al., 2016).

1.2 Mål och syfte

Målet med förstudien är att skapa ett underlag, som tillsammans med andra arbeten, kan användas som utgångspunkt för att ta fram vägledningsmaterial och verktyg för bedömning av de effekter som klimatförändringen kan få på riskerna vid förorenade områden.

Syftet är att på sikt förbättra avhjälpandeprocessen vid förorenade områden. Detta så att den bättre kan hantera klimatförändringen och dess effekter, särskilt för momentet riskbedömning, men även för andra moment i processen (se Naturvårdsverket, 2024a).

1.3 Avgränsning

Rapporten har en bred syn på risker vid förorenade områden, men fokus ligger på de typer av risker som normalt beaktas vid riskbedömning av förorenade områden, alltså risker för människa och miljö. Även risker i andra skeden av avhjälpandeprocessen behandlas översiktligt, exempelvis klimatpåverkan på efterbehandlingsåtgärdens genomförande (Branzén, 2023).

Klimatförändringen förväntas leda till en mängd olika effekter, varav de som bedöms vara viktigast vid förorenade områden diskuteras i denna rapport. Genomgången är dock inte komplett och ytterligare effekter kan uppkomma. Exempelvis redovisar Nilsson et al. (2005) ytterligare ett antal förväntade, men osäkra effekter, såsom ytlig sprickbildning i marken till följd av torka, med snabbare infiltration av nederbörd som följd.

Den litteraturgenomgång som gjorts i förstudien har varit översiktlig. Det kan därmed finnas ett behov av fördjupade litteraturstudier i vissa frågor, se förslagen på fortsatt arbete i kapitel 6.

Notera att slutsatserna i denna rapport grundar sig på den information som varit tillgänglig år 2024 samt de bedömningar och tolkningar som gjorts av författarna. Både fakta, bedömningar och slutsatser kan komma att förändras i framtiden.

1.4 Nyttan och relevans för samhället

I dagsläget saknas både vägledning och verktyg för att genomföra en samlad bedömning av hur klimatförändringen kan påverka riskbilden vid förorenade områden. Denna förstudie bör kunna användas som utgångspunkt för att ta fram sådana vägledningar och verktyg. Detta gör i sin tur det möjligt att hantera frågorna bättre i samband med utredning och åtgärd av förorenade områden, vid utformning av kommunala detaljplaner samt vid tillståndsgivning och tillsyn av miljöfarliga verksamheter. Det genererar nytta för samhället i form av bättre riskhantering och färre felbeslut.

1.5 Läsanvisning

Kapitel 2 innehåller en beskrivning av hur klimatet i Sverige förväntas utvecklas fram till år 2100. Beskrivningen är övergripande och omfattar främst förändringar i temperatur och nederbörd, men även förändringar i vattentillgång, korttidsnederbörd, havsnivåer med mera. Informationen som redovisas utgör utgångspunkten för de arbeten som har genomförts i uppdraget.

I kapitel 3 görs en strukturerad identifiering och genomgång av de aspekter som påverkas av klimatförändringen och som har potential att påverka riskerna vid förorenade områden. Fokus ligger alltså på de frågeställningar som brukar hanteras vid riskbedömning av förorenade områden. Genomgången utgår från konceptet *Föroreningskälla – Föroreningstransport – Skyddsobjekt*. De tre delarna belyses i separata avsnitt i kapitel 3. Varje avsnitt avslutas med en genomgång av hur Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden för förorenad mark hanterar respektive frågeställning samt huruvida det finns behov av att komplettera eller justera modellen.

Genomgången i kapitel 3 kompletteras i kapitel 4 med hur klimatfrågorna påverkar ytterligare moment i avhjälpandeprocessen. Kapitel 4 ger alltså en bredare bild av hur klimatförändringen kan påverka avhjälpandeprocessen eftersom fler moment diskuteras, från övergripande åtgärds mål till efterbehandlingsåtgärdens genomförande.

I kapitel 5 sammanfattas rapportens slutsatser. Rapporten avslutas med ett kapitel med förslag på fortsatt arbete för att minska osäkerheterna och för att fylla de kunskapsluckor som finns.

I en bilaga till rapporten presenteras en beräkningsmodell kallad RUSLE. Den skulle möjligen kunna användas för att kvantifiera storlek på erosion via ytavrinning på förorenade områden. Modellen illustreras med ett exempel. Vidare redovisas beräkningsresultat för generella erosionsriktvärden beräknade med RUSLE. Tanken är att bilaga 1 ska kunna användas som underlag för fortsatt utredning om och hur Naturvårdsverkets riktvärdesmodell ska kompletteras med spridningsvägen erosion via ytavrinning.

2 Klimatets förändring i Sverige

2.1 Inledning

FN:s klimatpanel (IPCC¹) har under de senaste 20 åren genomfört ett flertal utvärderingar som rör klimateffekter. År 2014 publicerade klimatpanelen en utvärdering av kunskapen om klimatets förändring (IPCC, 2014). En av slutsatserna är att det är ytterst sannolikt att det är mänsklig påverkan som är den främsta orsaken till den globala uppvärmning som har skett sedan mitten av 1900-talet. Andra slutsatser är exempelvis:

- Risker som kopplar till någon form av extrem väderhändelse ökar ytterligare vid högre temperaturer (mycket troligt).
- Påverkan på den biologiska mångfalden med tillhörande inverkan på ekosystemtjänster resulterar i större risker vid en ytterligare uppvärmning på 3 °C (mycket troligt).
- Med ökande uppvärmning kan oåterkalleliga förändringar uppstå i såväl fysiska system som i ekosystem.

IPCC har publicerat en ny syntesrapport med sin senaste utvärdering av kunskapen om klimatets förändring (IPCC, 2023). Rapporten konstaterar bland annat att:

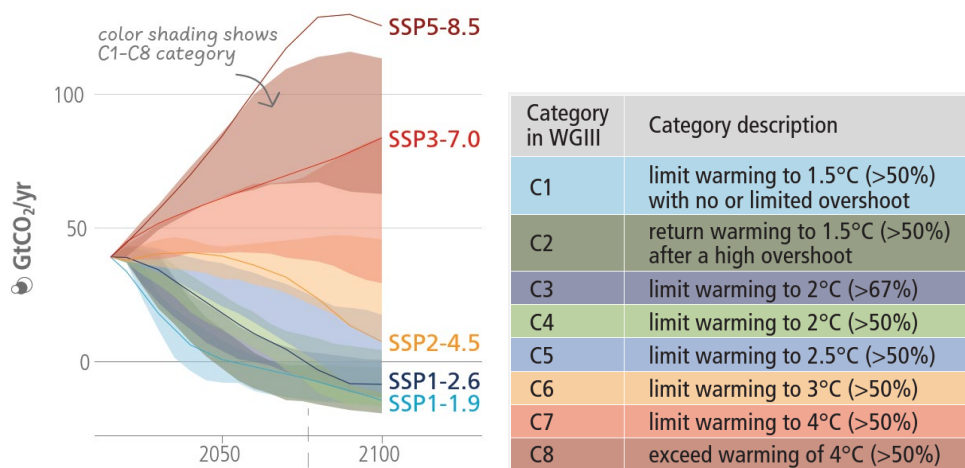
- Den globala medeltemperaturen är på väg uppåt.
- Den globala medelnederbörden över land sannolikt har ökat sedan 1950.
- Den genomsnittliga globala havsnivån har stigit med 0,2 m under perioden 1901 till 2018. Havsnivåhöjningen mellan 2006 och 2018 var 3,7 mm/år.
- Det är nästan helt säkert att den övre delen av havet (0–700 m) har värmts upp sedan 1970-talet.

De resultat som redovisas i IPCC (2023) baseras på olika scenarier (eng. *Representative Concentration Pathways, RCP*) som var och ett beskriver den framtida utvecklingen avseende utsläpp av växthusgaser samt andra klimatpåverkande faktorer. Av dessa scenarier har tre (RCP2.6, RCP4.5 och RCP8.5²) valts som utgångspunkt för en detaljerad analys av ett framtida klimat i Sverige (Kjellström et al., 2022).

Scenariot 2.6 innebär att utsläppen av växthusgaser har nått sitt maximum redan idag, medan scenariot RCP4.5 innebär stora utsläpps begränsningar i framtiden, vilket gör att utsläppen av växthusgaser kulminerar kring år 2040. RCP8.5 är ett scenario med framtida utsläpp av växthusgaser som är höga. Utsläpp av koldioxid för olika scenarier åskådliggörs i Figur 2-1. En bedömning av hur olika klimatrelaterade parametrar kommer att förändras sammanfattas i Tabell 2.1.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² RCP2.6 – Temperaturhöjning max 2 °C, RCP4.5 – Temperaturhöjning max 3 °C, RCP8.5 – Temperaturhöjning > 4 °C.



Figur 2-1 Utsläpp av koldioxid för respektive scenario (IPCC, 2023).

Tabell 2.1 Sammanställning över förändring i olika parametrar vid ett förändrat klimat (Kjellström et al., 2022 och Eklund et al., 2015).

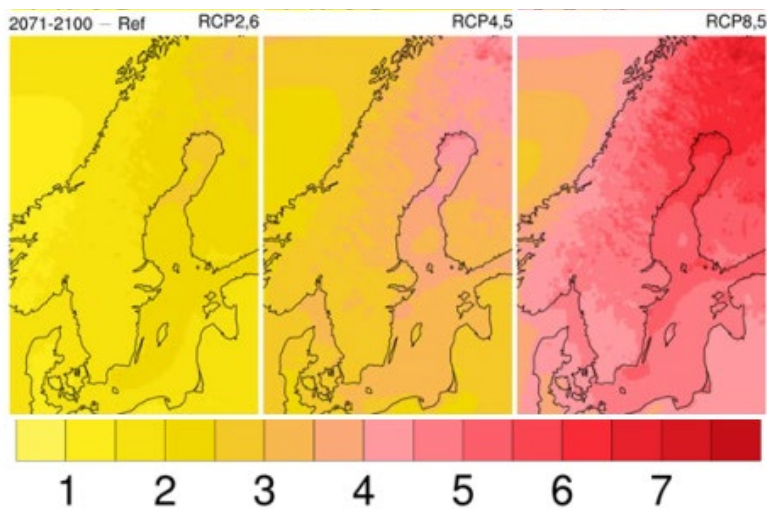
Parameter	Förändring
Lufttemperatur	Ökning i hela landet, främst i norra Sverige och främst vintertid.
Medelnederbörd	Ökning i hela landet, störst i de norra delarna och på Västkusten och främst under vintern.
Kraftig korttidsnederbörd	Ökning i hela landet, främst för de korta varaktigheterna.
Vattentillgång	Ökning av årsmedel i hela landet förutom östra Götaland. Ökningen är störst på vintern. Minskning på sommaren, främst östra Gotland.
100-årsflöde och 200-årsflöde	Ökning i stora delar av landet. Minskning i Norrlands inland och norra kustland samt nordvästra Svealand.
Lågflöden	Mer vanligt i Götaland och Svealand, främst östra Götaland.
Havsnivåer	Stigande havsnivå, nettoökningen störst i södra Sverige.

2.2 Temperatur

I de tre klimatscenerierna bedöms årsmedeltemperaturen öka i hela Sverige, mest i de norra delarna av landet, se Figur 2-2. Figuren visar förändringen i årsmedeltemperatur för perioden 2071–2100 jämfört med perioden 1971–2000 för scenarierna RCP2.6, RCP4.5 respektive RCP8.5. Medeltemperaturen förutses öka från några enstaka grader (RCP2.6) upp emot 6–7 °C (RCP8.5). Medeltemperaturen kommer att öka under årets samtliga årstider, men vintertemperaturen beräknas stiga något mer än medeltemperaturen över året som helhet och vice versa under sommaren (Christensen et al., 2022).

Temperaturförändringen kommer att medföra att snötäcket och dess varaktighet i Sverige påverkas. En uppvärmning på 2 °C medför att säsongen med snö blir ungefär en månad kortare för stora delar av Sverige (Kjellström et al., 2022). Förändringen i antal dagar med snö skiljer sig dock över landet. Perioden med snötäcke kan komma att minska med en till tre månader i större delen av landet.

Vattentemperaturen i sjöar och vattendrag har inte analyserats av Eklund et al. (2015). Den beror dock av lufttemperaturen, varför författarna anser att det är rimligt att anta att även temperaturen i sjöar och vattendrag kommer att öka i framtiden.



Figur 2-2 Förändring av årsmedeltemperatur (°C) i Sverige under perioden 2071–2100 i förhållande till perioden 1971–2000 för tre olika scenarier (Kjellström et al., 2022).

2.3 Nederbörd

Vad gäller nederbörd leder de tre scenarierna till likartade resultat. Skillnaden är liten fram till 2050, men ökar efter det, se SMHI (2024). Nederbörden förväntas öka kraftigt under vinterhalvåret i Sverige. En ökning förutses även under sommaren, men i mindre omfattning. Detta illustreras i Figur 2-3.

Den extrema korttidsnederbörden beräknas bli mer intensiv i ett framtida klimat. Detta gäller främst skyfall med kort varaktighet (20 minuter), se Tabell 2.2. Det går inte att se några tydliga regionala skillnader. De modeller som används för att prediktera förändringar i regnintensitet i samband med framtida extremnederbörd har låg upplösning, vilket medför osäkerheter i de bedömningar som görs (Kjellström et al., 2022).

Förändringar i nederbörd förväntas innebära att salthalten i Östersjön sjunker (Bernes, 2016).

Tabell 2.2 Procentuell ökning av den mängd vatten som faller vid korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid³ i förhållande till perioden 1961–1990 (Eklund et al., 2015). Värdena anger medelvärdet för landet som helhet.

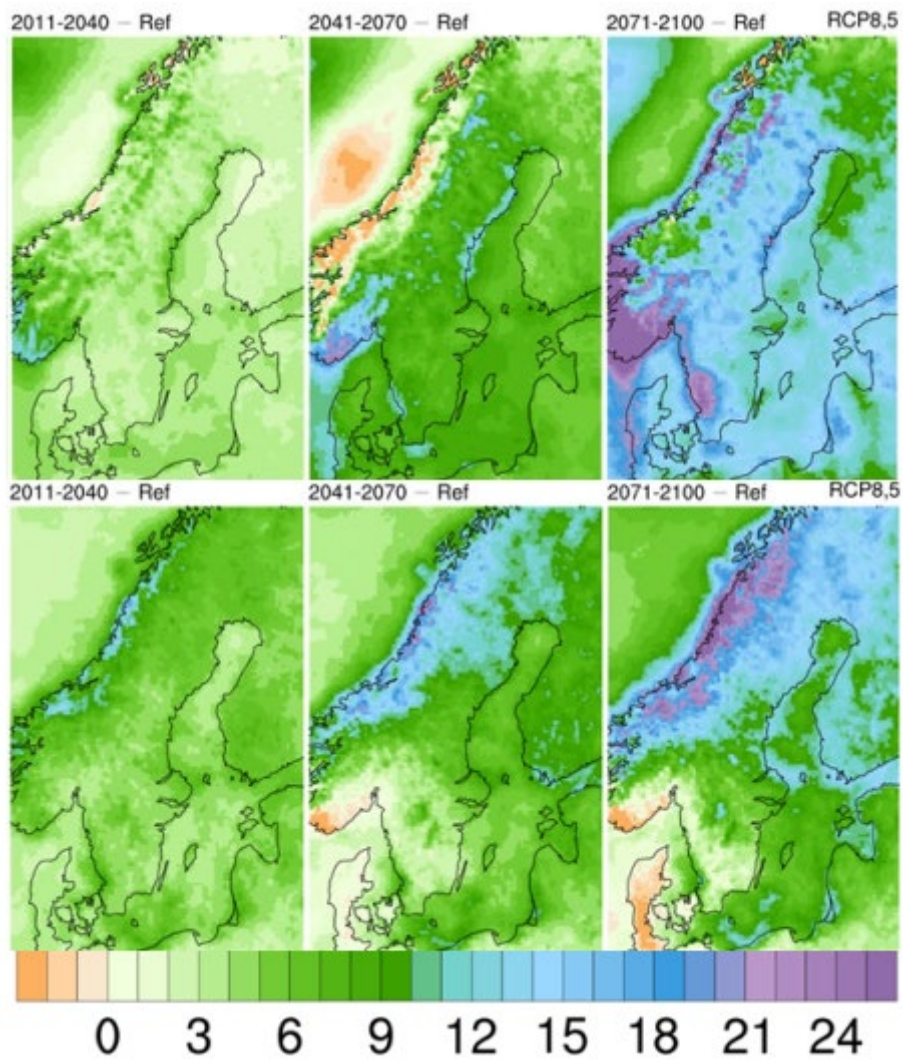
Varaktighet	2021-2050		2069-2098	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
20 min	19 %	23 %	30 %	51 %
1 timme	14 %	16 %	20 %	34 %
3 timmar	13 %	13 %	17 %	29 %
12 timmar	12 %	14 %	18 %	29 %

Vattentillgången kommer att öka i större delen av landet sett över året som helhet, se Figur 2-4. Sommartid förväntas dock tillgången på vatten att minska i större delen av landet. Vattenflödena i våra vattendrag kommer att minska på våren och sommaren, men öka under vintern. Extrema vattenflöden förväntas bli högre som en effekt av främst ökad nederbörd, men i mellersta och delar av norra Sverige kan den minskade snömängden leda till att extremflödena minskar. Antalet dagar med låga flöden bedöms öka i Götaland och stora delar av Svealand, med den största förändringen i östra Götaland. De lägre flödena orsakas av en ökad temperatur, vilket leder till högre avdunstning.

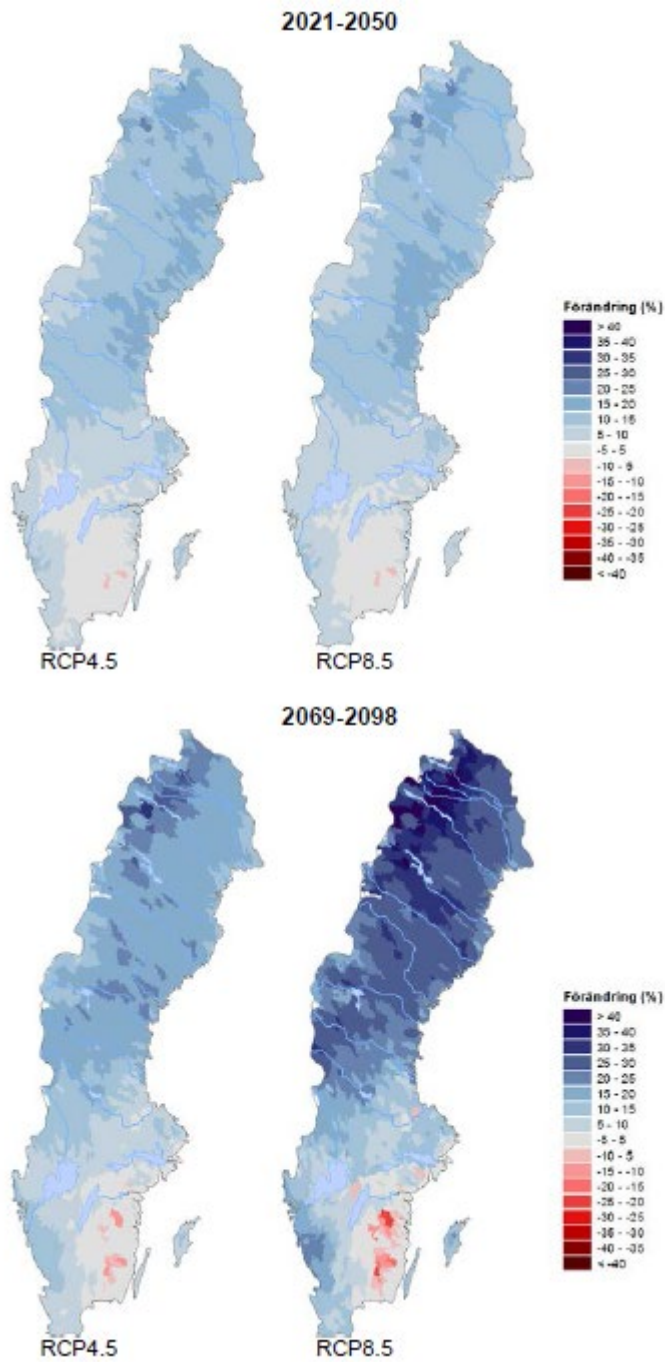
Globalt skattas havsnivån stiga ungefär en meter fram till år 2100 enligt IPCC. I Sverige motverkar landhöjningen till viss del effekten av en havsnivåhöjning, särskilt i norra Sverige. Detta innebär att höjningen av havsnivån är störst i södra Sverige, se Figur 2-5.

Hur vindförhållandena kommer att förändras i ett framtida klimat finns det inga entydiga svar på (Kjellström et al., 2022).

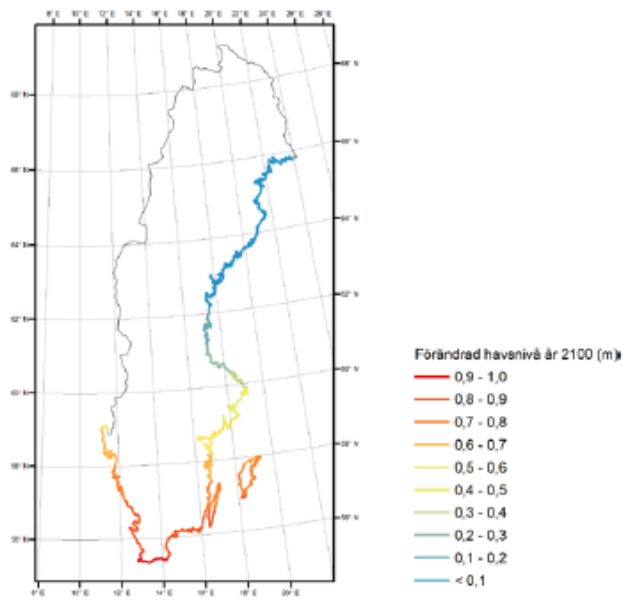
³ Återkomsttid beskriver hur ofta en händelse inträffar i medeltal (Kjellström et al., 2022).



Figur 2-3 Förändring av nederbörd (mm/månad) i Sverige i förhållande till perioden 1971–2000 för scenario RCP8.5 (Kjellström et al., 2022). Övre raden visar nederbördsförändringen under december till februari, undre raden under juni till augusti.



Figur 2-4 Förändring i vattentillgång i Sverige över hela året i förhållande till perioden 1961–1990 (Eklund et al., 2015).



Figur 2-5 Förändrad havsnivå år 2100. Enhet: meter. Figuren anger nettoeffekten av en global havsnivåhöjning under 100 år på en meter, korrigerad för lokal landhöjning (Eklund et al., 2015).

3 Klimatförändringens effekter

3.1 Metod för identifiering av effekter

Klimatförändringen förväntas ge effekter som kommer att inverka på förorenade områden. Naturvårdsverket har publicerat stöd och information för hantering av förorenade områden i ett förändrat klimat (Naturvårdsverket, 2024b). Informationen är i huvudsak övergripande. I detta kapitel görs ett försök att identifiera vilka effekter som kan förväntas av klimatförändringen och hur dessa påverkar riskerna vid förorenade områden. Identifieringsarbetet har utgått från Naturvårdsverkets vägledningar, främst vägledningen för riskbedömning (Naturvårdsverket, 2009b).

I en riskbedömning av ett förorenat område är begreppen föroreningskälla, förorenings-transport (spridning) och skyddsobjekt centrala, se Figur 3-1 och Naturvårdsverket (2009b). De föroreningar som finns inom området (främst i jord, grundvatten och sediment) frigörs och sprids via olika spridningsvägar till ett eller flera skyddsobjekt där exponering kan ske. Skyddsobjekten är primärt människa och miljö, men även andra skyddsobjekt kan förekomma.



Figur 3-1 Centrala begrepp vid riskbedömning av förorenade områden. I rapporten behandlas även belastning under rubriken föroreningstransport.

I en riskbedömning ska ovanstående delar bedömas, men även föroreningsmängd och belastning, förändring över tid samt riskreduktion (se Tabell 2.1 i Naturvårdsverket, 2009b). Av dessa är det främst belastningen som kan påverkas av klimatet. Vi har valt att inkludera belastning i föroreningstransport.

Kapitel 3 är indelat i tre avsnitt enligt Figur 3-1, med syfte att identifiera sådana aspekter av klimatförändringen som kan påverka riskerna vid förorenade områden. Identifieringen är bred, på så sätt att även vissa indirekta effekter har tagits med. Texten gör dock inte anspråk på att identifiera samtliga aspekter som kan finnas. Det viktiga är dock inte att skapa en fullständig lista utan att få med sådant som kan ha en tydlig effekt på riskerna. Både riskerna generellt vid förorenade områden och platsspecifikt vid ett visst objekt.

3.2 Föroreningskälla

3.2.1 Definition och avgränsning

Förändringar i klimatet kan komma att inverka på såväl markens fysikaliska som kemiska egenskaper, vilka påverkar föroreningskällan på olika sätt. Vilka dessa förändringar kan vara diskuteras i detta avsnitt. Begreppet föroreningskälla⁴ syftar i detta sammanhang på den förorening som finns i marken och som gör att ett område betraktas som förorenat.

Notera att klimatförändringen även kan skapa föroreningskällor. Det kan ske genom att klimatförändringen leder till processer och skadehändelser som skadar cisterner, ledningar och liknande, så att förorenande ämnen rinner ut i marken. Exempel på sådana skadehändelser är ras, skred och erosion. Hur klimatförändringen kan leda till nya föroreningskällor i marken berörs dock inte i denna rapport. Ämnet diskuteras däremot av Edelbalk et al. (2016).

3.2.2 Markegenskaper

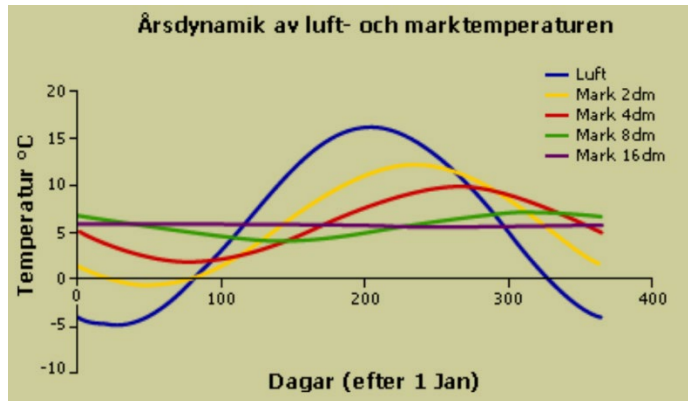
I detta avsnitt beskrivs hur en klimatförändring kan komma att påverka olika markegenskaper som har betydelse för ett förorenat område.

Mark- och grundvattentemperatur

Omgivningstemperaturen har en inverkan på marktemperaturen. Effekten blir störst närmast markytan och avtar med ökande markdjup. Förändringen i marktemperatur uppvisar en tröghet, vilket gör att en temperaturändring i markytan inverkar på temperaturen i djupare marklager långt senare (Skogen.se, 2024). Figur 3-2 visar ett exempel på detta.

En ökad årsmedeltemperatur återspeglas även i grundvattentemperaturen. Mätningar som Sveriges geologiska undersökning (SGU) har genomfört visar att temperaturen hos grundvattnet har ökat med cirka 1,5 °C de senaste 50 åren och att detta följer trenden med en ökning i lufttemperaturen (SGU, 2024). Förändringar i grundvattnets temperatur kan inverka på nedbrytningen av organiska ämnen och lösligheten för ämnen i marken, men kan även förändra grundvattnets flödesmönster (SGU, 2013). Studier av effekten av ett förändrat klimat på grundvattentemperaturer har tidigare bedömts vara eftersatt (SOU, 2015).

⁴ Föroreningen i marken kan ha orsakats av spridning från en primär föroreningskälla, till exempel en cistern eller en tankvagn. I denna rapport syftar dock föroreningskälla på den sekundära förorening som finns i marken vid ett redan tidigare förorenat område.



Figur 3-2. Exempel på hur marktemperaturen varierar med lufttemperaturen över året (SLU, 2019).

Sammantaget bedöms de förändringar i medeltemperaturer som beskrivs i avsnitt 2.2 kunna leda till att såväl mark- som grundvattentemperaturen kommer att öka i framtiden.

pH

En viktig variabel för föroreningars rörlighet är markens pH. Detta gäller framför allt för metaller, men även vissa organiska föreningar påverkas. Ett exempel är klorfenoler. Klorfenoler är svaga syror, vilket innebär att klorfenolmolekylen över ett visst pH-värde dissocieras, sönderdelas, och övergår från oladdad molekylform till en laddad jon. Detta gör att ämnet får en större benägenhet att förekomma i vattenfasen och det blir därmed betydligt mer rörligt i marken.

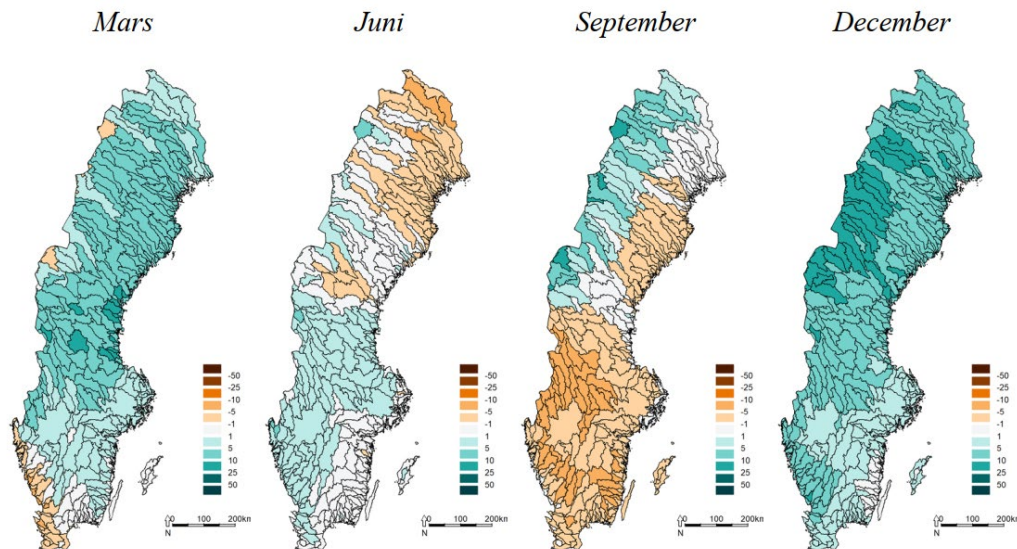
En ökning i nederbörd kan medföra en försurning i marken genom utlakning av katjoner (Gelybó et al., 2018; Rengel, 2011). Jordar som är fattiga på kalcium, såsom sandiga jordar, är mest känsliga (van Dijk et al., 2009). Med undantag för stora delar av Skåne och Västgötaslätten är markens buffringsförmåga i Sverige ganska svag (Sveriges Vattenmiljö, 2024). pH-förändringar i mark är dock generellt en långsam process (Gelybó et al., 2018), särskilt i jämförelse med en ytvattenrecipient (Biswas et al., 2018).

Sammantaget bedöms att försurning är den process som främst inverkar på en förändring i markens pH. I vilken omfattning som ett förändrat klimat påverkar pH är oklart.

Fukthalt

Markens fukthalt sjunker under perioder med låg nederbörd och ökar i samband med nederbörd. Temperaturen påverkar fukthalten genom att avdunstningen förstärks vid ökande temperatur. Även upptaget av vatten i vegetation har en inverkan på markens fukthalt, främst under den varma delen av året. Hur mycket vatten som tas upp av vegetationen beror bland annat av mängden och typen av växter.

Nederbörden förväntas öka i Sverige generellt i framtiden – ju större klimatförändring desto högre nederbörd⁵, se Figur 2-3 (Kjellström et al., 2022; SMHI, 2024). Detta talar för att markens fukthalt kommer att öka, men effekten motverkas av att avdunstningen ökar i och med att temperaturen i luft och mark blir högre. Scenariomodellering indikerar att markfukten ökar under stora delar av vintersäsongen, särskilt tydligt i landets norra delar, medan marken väntas bli torrare i många områden under sommar och höst (Kjellström et al., 2022). Detta exemplifieras för RCP4,5 i Figur 3-3.



Figur 3-3 Förändring i markfuktighet (nederbörd minus avdunstning) för perioden 2014-2070 jämfört med referensperioden (1971-2000) för scenario RCP4,5 (Kjellström et al., 2022). Grått anger oförändrad markfuktighet, gröna nyanser en ökning och orange nyanser en minskning i markfuktighet.

En ökning i markfuktighet innebär att transporten av flyktiga ämnen i gasform upp genom markprofilen bromsas, samtidigt som förutsättningarna för transport av ämnen lösta i porvattnet ökar. Den senare effekten är särskilt påtaglig för ytaktiva ämnen som exempelvis PFAS. Tillgång på vatten innebär även att bakteriell nedbrytning av exempelvis LNAPL⁶ ökar (Nilsson et al., 2005). Ökad markfuktighet kan även kopplas till högre grundvattennivå, vilket innebär att avståndet mellan grundvatten och byggnad blir kortare, vilket underlättar inträngning av ånga. Det finns alltså delvis motverkande effekter när det gäller spridningen av flyktiga ämnen.

Den sammantagna bedömningen är att förändringen i markfuktighet kommer att vara säsongsberoende, men också att en betydande variation över landet kan förväntas.

Organiskt material

Nedbrytning av organiskt material är en påtaglig källa till löst organiskt kol. Vid nedbrytning frigörs ämnen som har varit fastlagda, alltså sorberade, till organiska

⁵ Viktiga regionala skillnader kan dock förväntas.

⁶ LNAPL = Light Non-Aqueous Phase Liquid, dvs en vätska som har en lägre densitet än vatten

partiklar. Detta medför att transporten av föroreningar med grundvatten (och indirekt från grundvattnet via ånga) ökar och att ämnet även blir mer biotillgängligt.

Förhöjd temperatur verkar för en ökad nedbrytning av organiskt material, vilket leder till ökade halter av löst organiskt material i grundvatten (Lipczynska-Kochany, 2018). En tydlig koppling mellan årsmedeltemperatur och regionala halter av löst organiskt material i bäckvatten har påvisats (Laudon et al., 2012). Datasammanställning som Laudon och medarbetare redovisar visar att de högsta halterna erhålls i temperaturintervallet 0 – 3 °C. Även markens fukthalt inverkar. Perioder med torka innebär att nedbrytningen reduceras (van Dijk et al., 2009). Ett blötare klimat i framtiden kan därför leda till att nedbrytningen av organiskt material kommer att öka. Samtidigt finns det en effekt som innebär att växtligheten gynnas av högre temperaturer och därmed även kolinflödet till marken.

Mer nederbörd kan leda till en ökad utlakning av löst organiskt kol (DOC) från skogsmark. Fram till år 2050 förväntas en måttlig ökning av halten löst organiskt kol i vattendrag och då huvudsakligen i norra Sverige (Naturvårdsverket, 2016a). Ökningen bedöms kunna uppgå till några enstaka procent av de 5 – 10 mg/L som vanligtvis förekommer idag. Förklaringen till att halterna ökar är en snabbare nedbrytning av organiskt material och en något högre produktion av förna. Denna ökning i DOC-halter gäller för ett scenario som representerar dagens skogsbruk. För scenarier med ett högre uttag av biomassa än idag, förutses däremot en trend med sjunkande DOC-halter under samma period.

Sammantaget bedöms inverkan av ett förändrat klimat på markens kolförråd inte vara entydig, eftersom mängden kol i marken styrs av både tillförsel av organiskt material och nedbrytning. Högre temperaturer talar för en ökad vegetationstillväxt och att mer kol lagras i marken, samtidigt som högre temperaturer medför en ökad nedbrytning.

Redoxförhållanden

Markens redoxförhållanden styrs av tillgången på syre. Syrehalten påverkas bland annat av markens fukthalt, mikrobiell aktivitet och tillgången på lättnedbrytbart organiskt kol. Torka och nederbörd påverkar markens fukthalt och därmed markens redoxpotential. Perioder med torka innebär en högre redoxpotential än under vintern eller under perioder med nederbörd (van Dijk et al., 2009).

Ökad nederbörd i ett framtida Sverige skulle kunna innebära högre grundvattennivåer och därmed mer reducerande förhållanden. Samtidigt leder perioder av torka till lägre grundvattennivåer och mer oxiderande förhållanden.

Sammanfattningsvis kan man förvänta sig att klimatförändringen kommer att ha en inverkan på redoxförhållandena. I vilken omfattning är däremot svårbedömt.

3.2.3 Föroreningar och deras egenskaper

De klimatförändringar som är att vänta kommer att kunna påverka hur föroreningar uppträder i miljön. Det gäller exempelvis hur en viss förorening fördelas mellan olika medier (jord, vatten och luft). Fördelningen mellan olika medier styrs dels av markegenskaper, som diskuteras i föregående avsnitt, dels av föroreningarnas förekomstform och deras egenskaper.

De egenskaper som är relevanta i detta avseende är i huvudsak ämnets löslighet och flyktighet samt fördelningskoefficienterna mellan oktanol/vatten (K_{ow}) och vatten/organiskt kol (K_{oc}) för organiska föreningar respektive jord/vatten (K_d) för metaller. För ytaktiva ämnen har även fördelningskoefficienten mellan luft/vatten en betydande inverkan. Flyktigheten beskrivs med ämnets ångtryck eller Henrys konstant. Det finns även studier som visar att högre temperaturer leder till ökad toxicitet för vissa ämnen (Schiedek et al., 2007).

Förekomstform

Ett ämne kan förekomma i olika former; i lösning som en molekyl/ion eller i gasform. Som nämnts i föregående avsnitt inverkar markegenskaperna på metallers förekomstform. Exempelvis kan arsenik förekomma som trevärd eller femvärd jon i naturen beroende på redoxförhållanden och markens pH. På samma sätt kan krom förekomma i en trevärd och en sexvärd form. Vilken form ett ämne förekommer i påverkar bland annat ämnets mobilitet (Berggren Kleja et al., 2006; Smedley och Kinniburgh, 2002). Mer oxiderande förhållanden, till följd av förändringar i grundvattennivåer, skulle därför kunna leda till större rörlighet av arsenik (Jarsjö et al., 2019).

Ett ämnes förekomstform kan även inverka på hur toxiskt det är för en organism. Trevärd arsenik är mer toxisk för människor än den femvärd formen (Magalhães, 2002) och den sexvärd formen av krom är mer toxisk än trevärd krom (Berggren Kleja et al., 2006). Som nämnts tidigare styrs förekomstformen av de markkemiska egenskaperna och en förändring av dessa egenskaper kan innebära att förekomstformen förändras.

Omvandling

Ett ämne kan omvandlas till en annan förening, även om de markkemiska egenskaperna är oförändrade. Organiska föreningar kan i vissa fall brytas ned biologiskt. Denna process är temperaturberoende. Förhöjda temperaturer förväntas medföra att den mikrobiella aktiviteten ökar (van Dijk et al., 2009), vilket indikerar att möjligheterna till biologisk nedbrytning av föreningar kan förstärkas i en framtid.

En annan omvandlingsprocess är metylering, som är av betydelse för bland annat kvicksilver. I miljön förekommer kvicksilver vanligtvis i elementär form (Hg^0), som tvåvärt kvicksilver (Hg^{2+}) eller kvicksilverklorid (Hg_2Cl_2) (Ohlsson et al., 2014). Kviksilver kan dock metyleras varvid kvicksilver i oorganisk form omvandlas till organiskt kvicksilver (så kallat metylkvicksilver). Metylkvicksilver är betydligt mer toxiskt och kan tas upp av biota i större omfattning än kvicksilver i oorganisk form. Metyleringen

sker med hjälp av bakterier under specifika redoxförhållanden (reducerande miljö) och ökar med ökande temperatur (Skylberg et al., 2006).

Hydrolys är en kemisk reaktion som innebär att ett ämne omvandlas då det reagerar med vatten. Nedanstående ekvation exemplifierar detta för koppar. Omfattningen av omvandlingen av en förening genom hydrolys är temperatur- och pH-beroende. Ju högre pH är, desto längre förskjuts reaktionen åt höger, det vill säga jonen CuOH^+ dominerar. Omvänt, vid låga pH-värden dominerar kopparjonen (Cu^{2+}):



Som ett led i projektet *Klimatets påverkan på koncentrationer av kemiska ämnen i grundvatten* har SGU genomfört en utredning där man studerat sambandet mellan grundvattennivåer och grundvattenkemi (Aastrup et al., 2012). Analysen baseras på grundvattenkemiska tidsserier från miljöövervakningen och tidsserier av grundvattennivåer (SGU:s grundvattennät). Miljöövervakningen av grundvatten syftar till att följa effekterna av försurning, övergödning och nedfall av luftburna metaller på grundvattnet. Prover är huvudsakligen uttagna i källor samt till viss del från observationsrör för grundvatten eller kommunala vattentäkter och de representerar såväl ytligt grundvatten i små grundvattenförande jordlager som större grundvattenförekomster. Aastrup et al. (2012) konstaterar att sambandet mellan grundvattennivåer och grundvattenkemi skiljer sig markant mellan grundvattenmagasin som utgörs av morän respektive sand/grus. För morän påvisas signifikanta, om än mycket svaga, samband för de flesta kemiska parametrar som studeras, men för grundvatten i sand/grus påvisas ett samband endast för ett fåtal parametrar.

Förhållandena vid många förorenade områden kan förväntas skilja sig markant från den typ av områden som SGU:s analys baseras på, särskilt på platser med heterogena fyllnadsmassor. Även halterna av olika ämnen kan avvika radikalt till följd av föroeningen. Vi gör därför bedömningen att resultaten från SGU:s utredning inte kan tillämpas direkt på förorenade områden utan måste tolkas med försiktighet. En generellt viktig slutsats från Aastrup et al. (2012) var dock att en faktor som är viktig för grundvattenkemin är de nivåer i marken där grundvattnet strömmar, eftersom det är kemin i dessa marklager som avgör grundvattnets sammansättning. Liknande slutsatser drogs av Jarsjö et al. (2019) vid en simulering av hur grundvattennivåer påverkade grundvattnets sammansättning vid förorenade områden.

3.2.4 Bedömning och hantering i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell

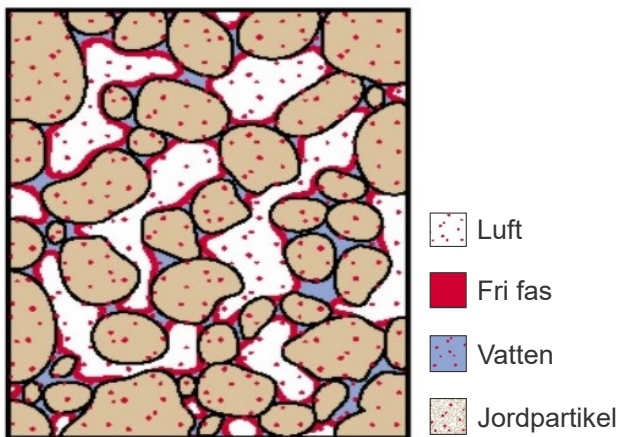
Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden (Naturvårdsverket, 2009a) är ett viktigt verktyg som används flitigt i branschen, som en hjälp att bedöma risker vid förorenade områden. Vissa av de processer som beskrivs i avsnitt 3.2 beaktas i denna modell, bland annat markens fukthalt och dess innehåll av organiskt material. Indirekt tas även pH i beaktande genom val av vissa ämnesspecifika data, såsom K_a -värden för metaller. Ämnenas förekomstform beaktas inte explicit med undantag för sexvärt krom, inte heller det faktum att det sker en omvandling av vissa ämnen. Parametrar som inte explicit ingår i modellen är temperaturen i mark och grundvatten samt redoxförhållanden.

Vi ser i dagsläget inget behov av att justera beräkningsmodellen med avseende på de processer som diskuteras i avsnitt 3.2. Däremot kan den påverkan som ett förändrat klimat har på dessa processer behöva beaktas i en riskbedömning, särskilt vid fördjupad riskbedömning.

3.3 Föroreningstransport

3.3.1 Processer

Inom ett förorenat område kan föroreningen förekomma i olika medier: fastlagd till jordpartiklar, löst i por- och grundvatten, i porgas eller som en fri fas. Detta illustreras i Figur 3-4. Vid bedömning av de risker som en förorening utgör för människor och för miljön krävs kännedom om hur föroreningen fördelas mellan olika medier i marken.



Figur 3-4 Schematisk bild av hur en förorening kan fördelas mellan olika delar av en jordmatrix (ASCWG, 2006).

Föroreningen i marken kan frigöras vid enskilda händelser, som ras, skred och yterrosion vid skyfall, eller långsamt över lång tid (utlakning, stranderosion, vinderosion med mera). Efter det att föroreningen frigjorts kan den spridas vidare med bland annat vatten, luft eller biota. Nedan görs en genomgång av de olika frigörelsemekanismerna och transportvägarna för föroreningen. I varje avsnitt görs en kort, kvalitativ bedömning av hur mekanismen eller spridningsvägen påverkas av ett förändrat klimat. En bedömning görs även av hur frågorna hanteras i Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden (avsnitt 3.3.14).

3.3.2 Utlakning

Utlakning via nederbörd

Föroreningar som förekommer i den omättade zonen kan lakas ut och transporteras nedåt i markprofilen med infiltrerande nederbörd. Generellt finns en tydlig koppling mellan ökad nederbörd och ökad transport av föroreningar i den omättade zonen.

Processerna som styr utlakningen kan se olika ut beroende på förorening och jordmatrix. Ett exempel på detta är ämnen som är lösliga och fastläggs svagt till jordpartiklar kontra ämnen som sorberar mycket hårt. Ett annat exempel är ytaktiva ämnen, såsom PFAS, vilka har en förmåga att ansamlas i fasgränsen mellan porluft och porvatten i den

omättade zonen. Efter nederbörd ökar förhållandet mellan andelen porer som är fyllda med vatten respektive luft i den omättade zonen. Det gör att PFAS, som har varit bundet i fasgränssytan, plötsligt kan transporteras nedåt genom den omättade zonen med infiltrerande och perkolerande nederbörd. Faran för PFAS-spridning i ett förändrat klimat har lyfts av SGI (2024) i en klimat- och sårbarhetsanalys.

Slutsatsen är att ökad nederbörd kan leda till ökad utlakning av föroreningar.

Utlakning vid höjd grundvattennivå

Ökad nederbörd leder ofta till högre grundvattennivåer. Om föroreningen finns strax ovanför dagens grundvattenyta kan en högre grundvattennivå leda till ökad utlakning. Dessutom är marken vanligen mer genomsläpplig högre upp i markprofilen, vilket innebär att flödet, och därmed föroreningstransporten från området, kan komma att öka (Jarsjö et al., 2019).

Sammantaget finns det alltså en potential för ökad föroreningsspridning från det förorenade området i ett förändrat klimat som medför en höjd grundvattennivå. Effekten är dock platsspecifik, eftersom den beror på de lokala hydrogeologiska förhållandena.

Urtvättning/utlakning i strandzon

En liknande process som ovan kan förekomma i strandzoner där ytvattennivån fluktuerar, exempelvis vid reglerade sjöar och vattendrag. Fluktuerande ytvattennivåer leder till att även grundvattennivåerna i direkt anslutning till vattendraget fluktuerar. På motsvarande sätt som ovan kan det leda till utlakning av föroreningar, om föroreningen finns i anslutning till grundvattenytan. Det är möjligt att klimatförändringen kommer att leda till kraftigare nivåfluktuationer än idag. Därför är det rimligt att anta att denna process kan ha en viss betydelse lokalt, även om effekten inte ska överdrivas.

En annan process i strandzoner är urtvättning av föroreningar på grund av fluktuerande ytvattennivåer som leder till hastig in- och utströmning av ytvatten i strandzonen. Processen har endast betydelse vid ytvatten där det sker snabba nivåförändringar och där föroreningen förekommer i mycket genomsläppligt material precis vid strandkanten. Vid en kraftig nivåhöjning i ytvattnet uppstår en mindre kilformad, omättad zon i strandkanten där ytvattnet snabbt kan strömma in och frigöra föroreningar. Processen kräver som sagt ett mycket genomsläppligt material i strandzonen, exempelvis slagg eller förorenat grus, och är därför ovanlig. Den kan förekomma platsspecifikt, men effekten bör inte överskattas.

3.3.3 Erosion som process

Föroreningsspridning i samband med mer eller mindre extrema nederbördshändelser har kommit att uppmärksammas alltmer, bland annat vid potentiella ras och skred och i samband med att förorenade områden översvämmas (se exempelvis Edebalk et al., 2016). Förutom dessa typer av katastrofartade händelser (naturolyckor) med lång återkomsttid sker även mer vardaglig erosion vid till exempel kraftiga regn, i samband med snösmältning eller på grund av höga flöden i vattendrag (stranderosion och bottenerosion).

Erosion är en process som innebär en borttransport av jord och berg och som orsakas av rinnande vatten, vågor, vind och is. Omfattningen av vågor och strömmar, vattenstånd samt flödes- och vindhastigheter inverkar alla på hur omfattande erosionen blir, liksom geologiska förhållanden, temperatur med mera.

Principen för när erosion kan ske är att skjuvspänningen som flödet av vatten eller luft ger upphov till måste överskrida den kritiska skjuvspänningen för att sätta markpartiklarna i rörelse. Det vill säga kraften i det framströmmande mediet måste vara tillräckligt stor för att markpartiklarna ska börja röra på sig. De mest erosionsbenägna jordarna är välsorterade jordarter med en kornstorleksfördelning motsvarande finsand och mellansand (SGI, 2024a). En morän är däremot mindre erosionsbenägen.

Erosion i mark sker med vatten och vind, och kan under vissa förhållande förväntas bidra till en transport av föroreningar till ytvatten som inte är obetydlig. Skyfall kan leda till att partiklar i markytan frigörs och förs bort av det avrinnande vattnet. Sluttande mark är mer benägen att erodera än plan mark, eftersom högre vattenhastighet uppnås. Om markytan lutar kraftigt kan ytavrinningen leda till erosion djupt ner i markprofilen och stora mängder jord kan på detta sätt erodera och transporteras bort. Även översvämning kan leda till erosion, beroende på terrängen och hur vattenmassorna rör sig.

3.3.4 Ras och skred

Historiskt har industriella verksamheter ofta lokaliserats i anslutning till sjöar och vattendrag. Sådana platser kan vara extra känsliga för förändringar i klimatet som medför ökade vattenflöden och därmed en förhöjd risk för bland annat ras, skred och stranderosion. SGI och MSB (2021) har identifierat tio nationella riskområden för sådana klimatrelaterade händelser, där förorenade områden är en typ av objekt som studerats. I arbetet konstaterades att det finns ett stort antal förorenade områden med riskklass 1⁷ inom riskområdena. Områden med potential för skred var i studien fyra gånger vanligare än områden med potential för ras.

Slutsatsen är att riskerna för ras och skred är platsspecifika, men att det finns potential för att sådana händelser kan bli vanligare i ett förändrat klimat. Även om händelserna är relativt ovanliga vid förorenade områden kan de leda till stora konsekvenser lokalt om de inträffar.

3.3.5 Erosion via ytavrinning

Erosion av mark vid förorenade områden kan bland annat ske till följd av ytavrinnande vatten vid kraftig nederbörd, snösmältning eller översvämning. Denna typ av erosion förekommer redan idag och kan förväntas öka i framtiden.

Denna typ av erosion uppkommer då vatten inte kan infiltrera på grund av att markens antingen är helt vattenmättad ända upp till markytan eller att markens infiltrationskapacitet överskrids. Överskottsvattnet rinner då av upp på markytan och om vattnets hastighet blir tillräckligt stor eroderar marken. I Sverige är ytavrinning i allmänhet vanligast i samband med snösmältning, eftersom tjälen då gör att marken är svårgenomtränglig, samtidigt som det tillförs stora mängder vatten under lång tid

⁷ Högsta riskklassen är 1 på en fyrgradig skala enligt den så kallade MIFO-metodiken (Naturvårdsverket, 1999).

(Djordjic & Markensten, 2019). Häftiga skyfall kan också ge upphov till kraftig ytavrinning.

Om topografin är den rätta och vegetationstäckes saknas kan ytavrinningen leda till kraftig erosion och snabb, partikelbunden föroreningstranport till diken, ytvatten med mera. Denna process förväntas bli mycket viktig i ett förändrat klimat, med ökad belastning på recipienten som resultat, se avsnitt 3.3.10.

Klimatförändringen bedöms kunna leda till ökad frekvens av översvämningar i anslutning till sjöar, hav och vattendrag. På motsvarande sätt som ovan kan översvämning leda till att föroreningar i marken frigörs och transporteras bort med vattnet. Vid SGI:s och MSB:s (2021) identifiering av riskområden noterades ett relativt stort antal förorenade områden där översvämning är möjlig. Översvämning som leder till yterrosion på ett förorenat område kan lokalt leda till kraftig föroreningsspridning.

Notera att i rapporten från SGI och MSB (2021) används begreppet erosion för att beteckna stranderosion, vilket innebär att erosion via ytavrinning inte täcks in (endast översvämning omfattas, inte erosion via nederbörd eller snösmältning). Denna process ingår inte heller i Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden (Naturvårdsverket, 2009a). Det finns alltså ett påtagligt behov av verktyg för att hantera sådana risker vid förorenade områden. Därför har erosion via ytavrinning studerats mer detaljerat i detta uppdrag. I bilaga 1 behandlas frågan ingående och en modell, RUSLE, för kvantifiering av erosionens storlek beskrivs. Modellen tillämpas även på ett typområde som hämtats från Naturvårdsverkets beräkningsmodell för riktvärden (Naturvårdsverket, 2009a). I exempelberäkningar visas att redan idag (befintligt klimat) kan erosion via ytavrinning vara en betydelsefull spridningsväg. I ett förändrat klimat, med högre nederbörd, är det uppenbart att erosion via ytavrinning behöver beaktas.

3.3.6 Stranderosion

Stranderosion innebär att material i strandkanten eroderar. Det är en naturlig process som sker kontinuerligt. Om det finns föroreningar i strandkanten bidrar stranderosionen till att föroreningarna sprids.

Stranderosion styrs av skjuvkrafter. Ökade flöden i vattendrag och förändringar i vågintensitet kommer därmed att påverka stranderosion som spridningsväg. I reglerade vattendrag förväntas endast små effekter.

I SGI:s och MSB:s (2021) identifiering av riskområden var bedömningen att endast ett fåtal förorenade områden riskerade att vara utsatta för stranderosion. Denna process bedöms därför vara av underordnad betydelse, även om den kan behöva beaktas lokalt.

3.3.7 Bottenerosion

Med bottenerosion avses i detta sammanhang erosion i botten av ett vattendrag. Klimatförändringen förväntas leda till ökade flöden, som kan erodera ytliga sediment och blottlägga äldre, mer förorenade sediment (Fröberg et al., 2021). Detta kan på vissa platser leda till partikulär spridning av föroreningar i vattendraget.

3.3.8 Vinderosion och spridning via partiklar i luft

Vinderosionen leder till spridning av partiklar i luft. För vinderosion gäller samma fysikaliska förutsättningar som för erosion med vatten, det vill säga skjuvkrafterna som vinden ger upphov till måste övervinna den kritiska skjuvspänningen för att sätta markpartiklarna i rörelse. För att detta ska ske krävs tre förutsättningar, som alla måste vara uppfyllda, nämligen stark vind, lättroderad jord och otillräckligt skydd av markytan i form av till exempel vegetation.

I den vetenskapliga litteraturen finns ett stort antal artiklar om vinderosion av gruvavfall (anrikningssand), medan det är svårare att hitta artiklar där man kvantifierat vinderosion från förorenade områden. Spridning av föroreningar genom vinderosion verkar alltså vara dåligt utforskat. Överhuvudtaget tycks kunskapen om hur vinderosion bidrar till jordförluster vara mindre än för erosion genom vatten.

Borrelli et al. (2017) uppskattade genom modellering den årliga vinderosionen på jordbruksmark i Europa till i medeltal 0,5 ton ha⁻¹. Enligt samma studie uppgår vinderosionen i Sverige till i medeltal 0,74 ton ha⁻¹ år⁻¹ och 6 % av den svenska jordbruksmarken skulle enligt studien ha en vinderosion på mer än 3 ton ha⁻¹ år⁻¹. På en bar markyta med förorenad jord torde det inte vara osannolikt med vinderosion i motsvarande storleksordning som för jordbruksmark. Erosionen skulle därmed potentiellt kunna vara i ungefär samma storleksordning som den som beräknas för erosion med vatten i bilaga 1.

Till skillnad från spridning med vatten bedöms spridning med vind ske mer diffust till omgivningen och inte primärt till närmaste vattendrag. Både mark och vatten utanför det förorenade området kan på detta sätt utsättas för föroreningarna.

I Sverige är vinderosionen begränsad och förekommer framför allt under perioder med starka vindar i områden med lättroderad jord. Klimatdataserier för vindhastigheter visar inte några tidsmässiga trender och det finns inte heller några tydliga effekter i klimatscenarier som leder till högre vindhastigheter⁸. Huvudsaklig påverkan av klimatet på spridning genom vinderosion bedöms ske vid långvarig torra, dels direkt genom torrare markförhållanden, dels indirekt på grund av ett sämre skydd från vegetationstäcket. En liknande indirekt effekt av klimatförändringen är att den kan påverka markanvändningen och därmed även vegetationstäcket.

Vinderosionen leder till spridning av partiklar i luft, vilket innebär föroreningsspridning från det förorenade området. I ett förändrat klimat kan spridningen öka under långa torrperioder, men det är svårbedömt om spridningen kommer att öka totalt sett. Lokalt, under rätt förutsättningar, förväntas denna typ av föroreningsspridning ha en viss betydelse. På de flesta förorenade områden är vinderosion inte ett problem, varken idag eller i ett framtida klimat, medan det på platser med bar markyta sannolikt kan utgöra en spridningsväg, särskilt under långa torrperioder. Detta är en platsspecifik effekt som kan förväntas på flera förorenade områden där föroreningen förekommer ytligt.

⁸ Se exempelvis SMHI (2023).

3.3.9 Spridning i grundvatten

Föroreningar som transporteras nedåt i jordprofilen kan nå grundvattnet. När föroreningarna når grundvattnet sker en fortsatt transport med grundvattnet i dess strömningsriktning⁹. Under transporten genom marken sker en utspädning av föroreningarna med grundvatten som inte härrör från det förorenade området.

Det finns en tydlig koppling mellan ökad nederbörd och ökad grundvattenbildning, vilken kan innebära att grundvattennivåerna höjs något, se avsnitt 3.3.2. Däremot är det inte säkert att nivåerna i ytvatten höjs i motsvarande grad vid ökad nederbörd, åtminstone inte i de reglerade vattendragen. Klimatförändringen kan alltså leda till något högre grundvattennivåer och därmed något kraftigare grundvattengradienter, men effekten kan variera mellan olika platser beroende på de hydrologiska och hydrogeologiska förhållandena.

Högre grundvattengradienter skulle kunna leda till något större grundvattenflöden. Vidare kan höjda grundvattennivåer leda till att utströmningsområdenas ytor ökar, vilket i sin tur kan medföra att ett förorenat område intill ett vattendrag, som tidigare legat i ett inströmningsområde, plötsligt kan befinna sig i ett utströmningsområde (Nilsson et al., 2005). Detta påverkar givetvis föroreningsspridningen från området.

Inom förorenade områden är det vanligt att de ytliga lagren i markprofilen utgörs av fyllnadsmaterial och att detta material är mer genomsläppligt, det vill säga har en högre hydraulisk konduktivitet, än underlagande naturliga material. Förändringar i grundvattennivåer kan därför i vissa fall leda till att grundvattnet når upp till nivåer där marken har en högre genomsläpplighet, se avsnitt 3.3.2. Detta skulle lokalt kunna leda till en snabbare föroreningsspridning, men de platsspecifika förhållandena kommer att vara avgörande.

Sammantaget finns det en potential för något högre föroreningstransport i grundvatten i ett förändrat klimat. Effekten är dock platsberoende.

3.3.10 Spridning till ytvatten samt belastning

De förändringar som förväntas i nederbörd (ökad medelnederbörd och kraftigare korttidsnederbörd) kommer att innebära att flöden i vattendrag ökar. I oreglerade vattendrag kan effekten bli att vattennivåerna höjs något. Detta, tillsammans med att lågvattenflöden förutses bli vanligare, indikerar att årstidsvariationerna i flöden och nivåer kommer att bli större. Det medför i sin tur att föroreningshalter, och möjligen även föroreningsmängder, som härstammar från förorenade områden, kan komma att variera mer i framtiden.

Redan idag är det många gånger svårt att mäta föroreningsbelastningen på ytvatten från förorenade områden. Detta gäller särskilt belastning via utströmmande grundvatten samt partikelburen spridning via ytavrinning. Eftersom större variation i grundvattenflöde kan förväntas, samtidigt som den partikelbundna spridningen ökar, kan det bli ännu svårare att mäta belastningen i ett förändrat klimat. Det finns således behov av utvecklade metoder för att bestämma belastningen från förorenade områden i ett förändrat klimat.

⁹ Diffusiv föroreningsspridning kan ske även i annan riktning.

En utgångspunkt för ett sådant arbete kan vara den belastningsrapport som SGI tagit fram (Fröberg et al., 2021).

3.3.11 Spridning via ånga

Flyktiga föroreningar i marken eller i grundvattnet kan förångas och stiga upp genom markprofilen via porluften. Markens fukthalt påverkar den utspädning av föroreningar som sker när ångorna transporteras upp genom marken. Mer fukt i marken kommer att ha en bromsande effekt på spridningen av förorening via porluft, se exempelvis Back et al. (2016b).

Ur risksynpunkt har spridning av föroreningar i ångfas störst betydelse vid inträngning i byggnader, vilket oftast sker underifrån. Där är marken normalt skyddad från nederbörd och porvattnets bromsande effekt på föroreningsspridningen via ånga saknas därför i stor utsträckning. Därför förväntas klimatförändringens effekter på denna typ av föroreningsspridning bli liten.

3.3.12 Spridning som fri fas

Föroreningsspridning som fri fas påverkas inte nämnvärt av klimatförändringen. Möjligen kan man tänka sig att fukthalten i marken ökar något på grund av ökad nederbörd, vilket leder till att mindre porutrymme är tillgängligt för den fria fasen i marken (exempelvis petroleumprodukt som är lättare än vatten). Det skulle i sin tur ha en bromsande inverkan på frifasspridningen, men effekten bedöms som närmast teoretisk.

3.3.13 Spridning via biota

Spridning av föroreningar via biota förekommer redan idag. Föroreningar i marken tas upp av växter och sprids vidare i näringsväven av primärkonsumenter (växtätare), sekundärkonsumenter (köttätare) och så vidare. I ett kraftigt förändrat klimat kan förväntas att artsammansättningen förändras, vilket skulle kunna ha en viss effekt på föroreningsspridningen via biota. Ett varmare klimat i kombination med mer nederbörd skulle kunna leda till ett större upptag av föroreningar i växternas biomassa, totalt sett. Effekten är dock mycket svårbedömd.

3.3.14 Bedömning och hantering i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell

Flera av de processer som beskrivs i avsnitt 3.3 beaktas i Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden, dock långt ifrån alla. Nedan diskuteras vilka processer som beaktas, vad som saknas och om det finns behov av kompletteringar när modellen ska tillämpas i ett förändrat klimat. Genomgången nedan följer i stort sett rubrikindelningen i avsnitt 3.3.

Utlakning

Utlakning beaktas i Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden. I modellen används ett schablonvärde på infiltrerande nederbörd och ett ämnesspecifikt K_d-värde, och det är möjligt att anpassa dessa värden efter plats specifika förhållanden. Det finns i nuläget inget behov av att göra en generell justering av dessa värden.

Även om utlakning beaktas saknas en viktig process för ytaktiva ämnen, såsom PFAS, vilka har en förmåga att ansamlas i fasgränsen mellan porluft och porvatten i den

omättade zonen. En översyn bör göras för att se om detta behöver åtgärdas, i och med att processen kan bli ännu viktigare i ett förändrat klimat med fluktuerande grundvattennivåer.

Riktvärdesmodellen hanterar inte de speciella processer som kan förekomma i strandzoner, se avsnitt 3.3.2. Behovet är dock litet eftersom dessa processer för det mesta har mycket liten betydelse. I de fall processerna ändå behöver beaktas kan detta göras platsspecifikt och antagligen med andra verktyg än beräkningsmodellen för riktvärden.

Ras och skred

Ras och skred behandlas inte alls i modellen. Sådana händelser är dock platsspecifika och kan knappast hanteras i en generell modell.

Erosion via ytavrinning

Spridning orsakad av erosion beaktas sällan vid riskbedömning av förorenade områden, trots att processen redan idag kan vara viktig. Erosion nämns som spridningsväg i Naturvårdsverkets vägledningsmaterial (Naturvårdsverket 2009a; 2009b), men någon egentlig vägledning ges inte.

Erosion, som orsakas av ytavrinnande vatten (nederbörd, snösmältning och översvämning), ingår inte i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell. Det finns ett tydligt behov av att komplettera Naturvårdsverkets modell och verktyg när det gäller erosion via ytavrinning, eftersom denna process bedöms bli än viktigare i ett förändrat klimat.

Stranderosion och bottenerosion

Varken stranderosion eller bottenerosion beaktas i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell. Dessa problem förväntas dock vara av mindre omfattning generellt och bör kunna hanteras med platsspecifika bedömningar. Det finns därför inte något större behov av att komplettera modellen med dessa processer.

Vinderosion och spridning via partiklar i luft

Vinderosion beaktas inte i Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden. Det innebär att förorenings-spridning genom vinderosion, till andra medier eller andra skyddsobjekt än människor, inte hanteras. Exponering genom inandning av damm ingår däremot som en exponeringsväg i modellen. För exponering av förorenat damm ansätts en halt jordpartiklar samt en viss andel som kommer från det förorenade området. Någon beräkning av masstransport görs däremot inte i modellen.

Eftersom det finns stora osäkerheter om och hur ett förändrat klimat kommer att påverka viderosionen och spridningen via partiklar i luft är det i nuläget tveksamt att komplettera riktvärdesmodellen med denna process. Däremot kan det vara lämpligt på sikt, när kunskapen om vinderosion på förorenade områden har ökat.

Spridning i grundvatten

Transport av förorening till ytvatten via grundvatten hanteras visserligen av modellen, men angreppssättet är mycket enkelt och möjliggör bara enkla belastningsberäkningar. Det finns därför ett behov av justering/komplettering med fokus på belastning, se nedan.

Spridning till ytvatten samt belastning

Föroreningsspridning till ytvatten beaktas visserligen i riktvärdesmodellen, men beräkningen av belastningens storlek behöver utvecklas. Det gäller särskilt spridning till ytvatten via erosion, som idag inte ingår i modellen.

Spridning via ånga

Riktvärdesmodellen beaktar spridning av ånga som leder till att människor exponeras. Inget tydligt behov av komplettering föreligger i ett förändrat klimat.

Spridning som fri fas

Spridning via fri fas hanteras delvis i riktvärdesmodellen, genom ett begränsningsvärde för respektive förorening. Det finns inte något behov av justering för att beakta ett förändrat klimat.

Spridning via biota

Upptag i växter samt människors exponering via intag av växter finns med i riktvärdesmodellen. Däremot beaktas föroreningsspridning i näringsväven endast indirekt, genom att ansatta riktvärden för skydd av markmiljö även ger ett visst skydd för sekundärförgiftning för vissa ämnen. Det är osäkert om och hur denna spridning påverkas i ett förändrat klimat. Det finns därför inget tydligt behov av justeringar i modellen i nuläget, men med ökad kunskap kan denna slutsats behöva omprövas. Däremot är det önskvärt med en tydligare hantering av denna spridningsväg generellt.

3.4 Skyddsobjekt

3.4.1 Indelning i skyddsobjekt

Med skyddsobjekt avses sådana objekt eller företeelser som ska skyddas. Både människan och miljön är värda att skydda från föroreningsskador och betraktas därför som skyddsobjekt med skyddsvärde. Detta styrs av miljöbalken, men det finns även en etisk dimension¹⁰.

Vid arbeten med förorenade områden delas ofta miljön in i ett antal separata skyddsobjekt, som bedöms var för sig, se exempelvis Naturvårdsverket (2009a) där skyddsobjekten i miljön utgörs av markmiljö, grundvatten och ytvatten. I föreliggande rapport har Naturvårdsverkets indelning kompletterats något, för att skyddsobjekten ska bli mer heltäckande. Följande indelning har gjorts av skyddsobjekt i miljön:

- Markekosystemet (markmiljön)
- Grundvatten och grundvattenberoende ekosystem

¹⁰ Människans skyddsvärde har sin grund i människovärdet. För miljön, eller ekosystemet som helhet, är det inte lika enkelt att definiera skyddsvärdet, men miljöbalken och dess förarbeten lägger grunden.

- Ytvatten och dess ekosystem
- Sediment
- Övriga ekosystem ovan mark (flora och fauna; biodiversitet)

Denna indelning täcker in skyddsobjekten i Naturvårdsverkets modell för riskbedömning av förorenade områden (Naturvårdsverket, 2009a; 2009b), kompletterat med sediment samt ekosystem ovan mark.

Klimatförändringen kan leda till att ytterligare skyddsobjekt utsätts för risker. Det kan exempelvis gälla tidigare efterbehandlade områden där förorening har lämnats kvar och åtgärdslösningen inbegriper någon typ av skyddskonstruktion, till exempel övertäckning eller markfilter. Sett ur ett klimatförändringsperspektiv kan även sådana skyddskonstruktioner betraktas som skyddsobjekt i den mening att de inte får skadas av de effekter som klimatförändringen kan ge upphov till. Denna typ av skyddsobjekt diskuteras därför i avsnitt 3.4.6 (Övriga skyddsobjekt).

Eftersom samtliga skyddsobjekt och exponeringsvägar inte beaktas fullt ut i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell kan det finnas behov av kompletteringar, i ett förändrat klimat. Sådana frågor diskuteras i avsnitt 3.4.7.

3.4.2 Skyddsvärden

Skyddsobjekten har olika skyddsvärden. Den kanske viktigaste typen av skyddsvärde avser naturens värde i sig, alltså naturens självständiga värde (egenvärde), vilket har stöd i miljöbalken och dess förarbeten, se Back et al. (2016a). Detta värde är oberoende av om objektet nyttjas som en resurs eller inte.

Resursvärden, eller instrumentella värden, är sådana värden som ger nytta för någon annan, till exempel för människor. Exempelvis kan grundvatten användas som en resurs för människor (dricksvatten, bevattning med mera), men grundvatten kan även vara en resurs för grundvattenberoende ekosystem som kan nyttja vattnet (organismer i våtmarker och andra utströmningsområden).

Värt att notera är att skyddsobjektens värden som resurser (instrumentella värden) kan komma att påverkas av klimatförändringen. Exempelvis kan klimatförändringen leda till att skyddsobjekt på vissa platser eller i vissa regioner får ett större ekonomiskt värde. Det kan bland annat handla om marken som odlingsresurs eller grund- eller ytvatten som resurser för dricksvattenförsörjning eller bevattning. Däremot kommer skyddsobjektens egenvärden inte att påverkas av klimatförändringen. Möjligen kan synen på sådana värden förändras över tid. Här finns dock en intressant frågeställning: Medför förändringar i klimatet att vissa biotoper och arter blir mer sällsynta och därmed får ett högre skyddsvärde av denna anledning? Det är svårt att ge ett bestämt svar på denna fråga, men så skulle kunna bli fallet. Sällsynthet, känslighet och unikheter är nämligen aspekter som ofta lyfts fram då naturens skyddsvärde diskuteras (Warkentin, 1995; Cihacek et al., 1996; Hågvar, 1998; Hopkins & Gregorich, 2013).

En viktig aspekt är att skyddsobjektens olika värden avser potentiella värden, det vill säga värden då skyddsobjekten inte är skadade av förorening. Det går alltså inte att argumentera för att skyddsvärdet är lågt på grund av en föroreningskada. Sådana

argument leder till cirkelresonemang och motverkar miljöbalkens intentioner. I stället är hela utgångspunkten i efterbehandlingsarbetet att skyddsobjektens skador ska avhjälpas, så att skyddsobjekten återfår sina potentiella värden. Detta kan bli extra utmanande vid en klimatförändring, eftersom klimatförändringen i sig kan leda till skador på ekosystem.

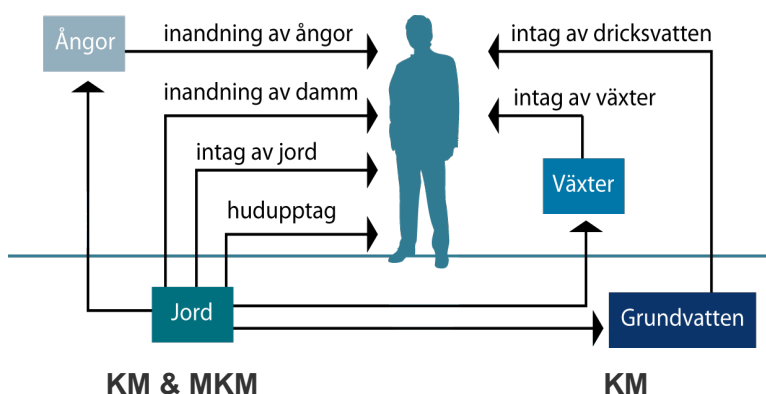
Sammanfattningsvis kan konstateras att klimatförändringen skulle kunna påverka skyddsvärdet hos skyddsobjekt, åtminstone på vissa platser. Vid platsspecifika bedömningar kan detta vara något som behöver beaktas.

3.4.3 Risker och exponeringsvägar

Denna rapport begränsas till risker som kan komma att påverkas när klimatet förändras, både risker som finns idag och sådana som kan uppkomma i framtiden. För skyddsobjektet människa är samtliga risker kopplade till människans exponering för föroreningen. Hur klimatförändringen påverkar människans exponering är därför central. I Naturvårdsverkets modell för riskbedömning och beräkning av riktvärden (Naturvårdsverket, 2009a; 2009b) beskrivs ett antal exponeringsvägar som har bedömts dominera exponeringen i allmänhet (Figur 3-5):

- Oralt intag av jord
- Hudupptag
- Inandning av damm
- Inandning av ångor
- Intag av växter
- Intag av dricksvatten

Det bör poängteras att denna lista på exponeringsvägar inte är komplett – även andra exponeringsvägar kan förekomma vid ett förorenat område. Då klimatet förändras kan vissa exponeringsvägar öka i betydelse och även sådana som inte beaktas i Naturvårdsverkets modell skulle kunna få viss betydelse, åtminstone platsspecifikt.



Figur 3-5 Exponeringsvägar som beaktas vid beräkning av riktvärden för förorenad mark (Naturvårdsverket, 2009a). KM = känslig markanvändning, MKM = mindre känslig markanvändning.

Det är idag svårt att göra en tillförlitlig prognos över hur mycket människans exponering för förorening via de olika exponeringsvägarna kan komma att förändras. Det finns flera orsaker till det:

- Exakt vilken situation som klimatförändringen kommer att leda till är oklart.
- Klimatförhållandena kan komma att variera geografiskt och över tid.
- Det är svårbedömt hur människor kommer att anpassa sig till förändringarna, vilket innebär att även exponeringen för föroreningar blir osäker. Livsstilsförändringar och beteenden är svåra att på förhand prognosticera.
- Klimatförändringen, i kombination med människors beteendeförändringar, kan leda till motverkande effekter på exponeringen. Exempelvis kan ett varmare klimat leda till att mer damm sprids till inomhusmiljön via öppna fönster, samtidigt som mer nederbörd kan leda till mindre damning.

Att i detalj förutspå framtida exponering är alltså inte möjligt. I stället är texten nedan inriktad på beskrivningar av vad som rimligen skulle kunna inträffa, både ökad och minskad exponering.

När det gäller skyddsobjekten i miljön är riskerna främst kopplade till spridning och transport av föroreningar, vilket diskuteras i avsnitt 3.3. I avsnitten nedan ligger i stället fokus på själva skyddsobjekten och hur dessa kan komma att påverkas av klimatförändringen på ett sätt som kan påverka riskerna.

3.4.4 Människor

Människor kan exponeras för föroreningar på en mängd olika sätt, se avsnittet ovan. I bedömningen av de risker som ett förorenat område kan utgöra för människor vägs de olika exponeringsvägarna samman, så att den sammanlagda risken kan bedömas. Betydelsen av de olika exponeringsvägarna kan komma att variera något mellan olika klimatscenarier.

Klimatförändringens effekter har potential att påverka människans exponering för föroreningar på två olika sätt. Dels kan klimatförändringen påverka själva mediet där föroreningen finns (jord, vatten, växter och så vidare) så att exponeringen förändras, dels kan människans livsstil och beteende komma att påverkas, och därmed även exponeringen för föroreningar. Nedan diskuteras några förväntade och möjliga effekter av klimatförändringen. Diskussionen begränsas till de sex exponeringsvägar som Naturvårdsverket (2009a) har lyft fram samt ytterligare några som författarna till denna rapport bedömer skulle kunna få en ökad betydelse i ett förändrat klimat.

Oralt intag av jord

Förorenad jord kan intas oralt genom att jord avsiktligt eller oavsiktligt hamnar i munnen eller genom att damm fastnar i mun och svalg. Det direkta intaget är störst hos barn som har ett så kallat pica-beteende.

Hur klimatförändringen påverkar är otydligt och det finns flera möjliga scenarier som kan verka i motsatta riktningar. Å ena sidan kan människor under perioder med ökad nederbörd förväntas vistas mer inomhus och därmed exponeras mindre för jord. Å andra sidan kan ett periodvis blötare klimat leda till att mer jord följer med skor och kläder in i

byggnader, med efterföljande exponering inomhus. Liknande effekter kan också uppkomma i samband med människors arbete utomhus – både en ökad och en minskad exponering kan bli fallet beroende på vilket scenario som studeras.

Här kan också nämnas kraftig erosion i samband med nederbörd, som skulle kunna frilägga förorenad jord och därmed öka intaget. Särskilt hos barn som leker i sluttningar eller diken. Kraftigare vegetation skulle kunna leda i motsatt riktning. Även mängden damm i luften skulle kunna öka, åtminstone periodvis med omfattande torka (se *inandning av damm* nedan). Därmed skulle även oralt intag av damm kunna bli större än idag.

Slutsats: Förändrat oralt intag av jord till följd av klimatförändringen är svårbedömt. Det finns faktorer som talar för både en ökad och en minskad exponering. Inverkan av ett förändrat klimat på denna exponeringsväg kan därför behöva studeras mer.

Hudupptag

Mängden jord som kommer i kontakt med en människas hud beror på människans livsstil, bland annat klädsel och graden av utomhusvistelse. Kortbyxor och t-shirt exponerar en större hudyta än heltäckande klädsel. Klädseln varierar mellan olika åldersgrupper, med årstid och även den verksamhet som bedrivs. Under en varm dag i hemmiljö skiljer sig klädseln normalt från hur man klär sig i arbetslivet.

I ett varmare klimat med längre värmeperioder kommer tiden då befolkningen går i lätt klädsel att öka. Den genomsnittliga temperaturökningen i Sverige bedöms bli 3–6 °C fram till år 2100. Antalet dagar med dygnstemperatur över 20 °C kommer också att öka fram till nästa sekelskifte. Därför förväntas antalet dagar som befolkningen bär lättare klädsel att öka och därmed även hudupptaget av förorening.

Närkontakt med jord innebär rimligen en större risk att huden exponeras för en större mängd jord, vilket i huvudsak bedöms ske utomhus. Ett varmare klimat skulle kunna leda till mer utomhusvistelse, men det är inte självklart att det automatiskt skulle leda till högre exponering via hudupptag. Blötare väderlek skulle kunna leda till mindre utomhusvistelse eller mer skyddande klädsel, vilket skulle minska exponeringen. Denna exponeringsväg är därför något svårbedömd.

Gatto och medarbetare har konstaterat att svettning medför att hudupptaget ökar (Gatto et al., 2016), vilket indikerar att upptaget genom huden skulle kunna öka i och med att klimatet blir varmare. Men att bedöma hur stor inverkan klimatet kan ha bedöms inte vara rimligt med dagens kunskapsläge.

Slutsats: Ett visst ökat upptag av förorening via huden kan förväntas, men förändringen bedöms bli liten. De data som idag är ansatta för exponerad hudyta i Naturvårdsverkets modell bedöms därför vara representativa även i ett framtida varmare klimat.

Inandning av damm

Halten av jordpartiklar i utomhusluften varierar kraftigt mellan olika platser och över tid. De faktorer som inverkar på exponeringen via inandning av damm är framför allt halten dammpartiklar i luften och människors vistelsetid i dammig miljö. Halten dammpartiklar i luften påverkas i sin tur av nederbörd, torka och hur vegetationen ser ut (olika typer av vegetation binder jorden olika hårt).

Van Dijk et al. (2009) konstaterar att kunskapen om betydelsen av klimatförändringens effekter på partikelhalter i luft är begränsad och att forskningsresultaten är motstridiga. En ökad risk för skogsbränder talar för ökade partikelhalter. Mer nederbörd talar i motsatt riktning, men utöver mängden nederbörd är även antalet dagar med nederbörd av betydelse. Färre regndagar skulle kunna få en motverkande effekt och leda till högre partikelhalt. Ökad vind innebär mer vinderosion, vilket också bidrar till högre partikelhalt i luften. Samtidigt sker en omblandning i luftmassan vilket motverkar detta.

Förändrade klimatförhållanden kan även påverka typen av växter som finns inom ett område. Det har även framförts att växtligheten kan komma att minska och därmed göra att vissa områden blir kala. Detta skulle kunna förstärka effekten av vinderosion och högre partikelhalter i luften. I de fall växtligheten gynnas av klimatförändringen kan partikelhalterna i luften däremot minska. Det beror på att växter och trädens lövverk fungerar som ett slags filter för luft (partiklar avsätts).

Sammantaget är det rimligt att anta att variationerna i partikelhalter mellan olika årstider kommer att öka i framtiden, men hur detta slår på årsbasis är svårare att uttala sig om. Riktigt torr väderlek, även om den bara inträffar under delar av året, eller vissa år, skulle kunna leda till ett omfattande damningsproblem. Lägg till detta ett blåsigt väder och en förändrad vegetation som inte binder jorden lika hårt som idag, så kan inandning av damm bli en betydligt viktigare exponeringsväg än vad den är idag. Samtidigt, under perioder med riklig nederbörd kan damningsproblemet vara litet, eftersom nederbörd motverkar damning.

Klimatförändringen skulle kunna leda till höjda halter av damm i både inom- och utomhusluft. Om det sker en förändring i partikelhalter utomhus är det rimligt att även halterna i inomhusluften förändras. I ett varmare klimat kommer det antagligen att bli mer vanligt att ha fönster öppna, vilket innebär att partikelhalter i inomhusluft kan komma att öka i framtiden. Det kan även vara så att högre temperaturer bidrar till att användningen av klimatanläggningar ökar, vilket skulle innebära att fönster i stället hålls stängda. Halterna i inomhusluften påverkas alltså av vädringsvanor och ventilation.

Slutsats: Det finns en potential för att inandning av damm skulle kunna bli en mer betydelsefull exponeringsväg i samband med klimatförändringen än vad den är idag. Omfattningen är däremot svårbedömd.

Inandning av ångor

Temperaturen har en effekt på avgången av flyktiga ämnen från jord och inandning av ångor är en av de mest direkta exponeringarna. Om det finns förorening i luften som andas in kommer människor ovillkorligen att exponeras. Det är därför extra viktigt att beakta denna exponeringsväg.

Den risk som människor utsätts för vid inandning av ångor är i praktiken begränsad till ångor som sprids in i byggnader från undergrunden. Atmosfärens temperaturhöjning har i detta sammanhang en mycket begränsad effekt. Möjligen skulle det kunna ske en något förhöjd avgång av flyktiga ämnen under långa sammanhängande värmeperioder, som leder till att marken värms upp även under byggnader, men denna effekt bedöms bli liten. Det är främst temperaturen i den ytliga jorden som påverkas av perioder med varmare väder, se Figur 3-2.

Det finns en koppling mellan höjda grundvattennivåer och inandning av ångor. Om grundvattenytan under en byggnad höjs, minskar avståndet från byggnaden ner till det förorenade grundvattnet, vilket kan öka inträngningen av flyktiga ämnen i byggnaden. Hur stor denna effekt kan bli är dock svårbedömt, eftersom effekten beror på flera olika faktorer som varierar platsspecifikt.

Det finns också andra aspekter att väga in: vädrings- och ventilationsaspekter. Ett varmare klimat skulle kunna leda till förändrade vädringsvanor och även justerade ventilationssystem. Effekterna av detta är osäkra och svårbedömda.

Förhållandet mellan vistelsetiden utomhus respektive inomhus kan påverkas av ett förändrat klimat. Högre temperatur talar för att en större andel av tiden kommer att tillbringas utomhus än idag, åtminstone på årsbasis. Ökad nederbörd pekar i motsatt riktning.

Slutsats: Sammantaget görs bedömningen att klimatförändringen möjligen kan ha en viss inverkan på den exponering som sker genom inandning av ångor. Effektens storlek beror på flera platsspecifika faktorer.

Intag av växter

Exponeringsvägen intag av växter är antagligen den exponeringsväg som allra tydligast skulle kunna påverkas av ett förändrat klimat. Det finns två faktorer som bidrar till detta. Dels kan upptaget av föroreningar i växter från mark och porvatten komma att påverkas, dels kan människors odlingsvanor och intag av egenodlade grönsaker förändras.

Den första faktorn, upptag av föroreningar i växter, skulle kunna påverkas av förändringar i exempelvis pH och redoxförhållanden. I vilken omfattning upptaget kan förändras har detta arbete inte kunnat hitta någon information om. Dessutom skiljer sig upptaget av föroreningar mellan olika växter.

Den andra faktorn, människors odlingsvanor och konsumtion av egenodlade grönsaker, är antagligen betydligt viktigare. Det finns flera möjliga scenarier, varav några är följande:

- Ett förändrat klimat kan leda till mer gynnsamma odlingsförhållanden och därmed ökad lokal odling och intag av egenodlade grönsaker.
- Växter som tidigare inte har kunnat odlas kan bli möjliga att odla.
- En mycket kraftig klimatförändring skulle kunna skada landets ekonomi, vilket kan leda till att husbehovsodling blir vanligare för att underlätta försörjningen.
- Under torra och varma förhållanden kan bevattningen komma att öka. Om bevattning då sker med förorenat yt- eller grundvatten kan det leda till upptag av föroreningar i växter.

Slutsats: Det finns en potential för att intag av växter skulle kunna bli en mer betydelsefull exponeringsväg i samband med klimatförändringen än vad den är idag. Dels kan upptaget av förorening i växter komma att förändras, dels kan förändringar i odlings- och konsumtionsvanor förutspås.

Intag av dricksvatten

Vid kommunal vattenförsörjning bör exponeringsvägen "intag av dricksvatten" förbli opåverkad av klimatförändringen. En något ökad exponering för förorenat grundvatten skulle dock kunna ske från privata brunnar till följd av ett varmare klimat. Högre temperatur bör dessutom leda till en något högre vattenkonsumtion. Dessutom är det inte omöjligt att privata brunnar, särskilt jordbrunnar, skulle kunna påverkas av föroreningar mer än idag, bland annat på grund av förändrade grundvattennivåer och geokemiska förhållanden (Jarsjö et al., 2019). I vilken omfattning detta kommer att ske generellt är däremot svårbedömt, eftersom de lokala förhållandena (hydrogeologi och geokemi) kommer att ha stor betydelse i det enskilda fallet.

Slutsats: En viss ökad exponering för föroreningar i grundvatten kan förväntas i samband med klimatförändringen, men effekten är antagligen mer av teoretiskt intresse än praktiskt. Lokalt kan det dock finnas platser där effekterna blir större.

Övriga exponeringsvägar

Människor kan naturligtvis exponeras för föroreningar från ett förorenat område även på andra sätt än de sex exponeringsvägar som diskuteras ovan. Exempel på andra exponeringsvägar är:

- Intag av kött- och mjölkprodukter samt ägg.
- Intag av fisk och skaldjur.
- Exponering via förorenat grundvatten i samband med duschande och bevattning (hudkontakt och inandning av ångor).
- Exponering via förorenat ytvatten i samband med bad (oralt intag och hudupptag).
- Exponering av sediment i samband med bad och fritidsaktiviteter.

Intaget av kött, mjölk och ägg kan komma att påverkas av klimatförändringen, men antagligen i begränsad omfattning. En försämrad samhällsekonomi till följd av klimatförändringen skulle kunna leda till mer lokal livsmedelsförsörjning. Att idag försöka bedöma detta blir dock spekulativt. Detsamma gäller intaget av fisk och skaldjur.

Exponering via förorenat yt- eller grundvatten kan komma att öka något, eftersom ett varmare klimat inbjuder till mer badande och duschande. Effekterna bedöms dock bli mycket små. Detsamma gäller exponering via sediment.

Slutsats: De exponeringsvägar som saknas i Naturvårdsverkets modell förväntas inte påverkas generellt i någon större omfattning. På vissa platser kan de dock få en viss betydelse.

Övriga aspekter

Ett förändrat klimat skulle även kunna leda till indirekta exponeringssituationer på platser där marken idag inte är förorenad. Ett varmare klimat kan nämligen bidra till skadedjursangrepp och att invasiva arter leder till problem. Det kan då vara lockande att använda kemiska preparat för bekämpning. Förorenande ämnen skulle då kunna spridas till mark och biota, och indirekt utsätta människor för exponering. Denna aspekt är dock spekulativ.

Ökad nederbörd skulle kunna leda till erosionsskador i närheten av cisterner och ledningar, med läckage som följd. Människors hälsa skulle på detta sätt indirekt kunna påverkas. Även detta är en spekulativ effekt som omöjligt kan kvantifieras i dagsläget.

Tillfälliga händelser, som ras och skred, kan komma att öka i ett förändrat klimat. När sådana händelser inträffar på förorenade områden kan den mänskliga exponeringen öka tillfälligt. Effekterna bedöms dock i de flesta fall bli övergående.

Samlad bedömning för skyddsobjektet människa

Människor exponeras för föroreningar i sitt dagliga liv, exempelvis via födan, dricksvattnet, omgivningsluften och produkter som vi kommer i kontakt, med exempelvis kläder. Till det kommer en eventuell exponering från ett förorenat område. Eftersom den totala exponeringen inte bör överstiga det tolerabla dagliga intaget (TDI), får det förorenade området endast bidra med en andel av TDI.

Som beskrivs i avsnitten ovan kan konsumtionsmönster och beteenden komma att förändras vid ett förändrat klimat. Exempelvis kan mängden dricksvatten som konsumeras öka i ett varmare klimat, andra grödor kan komma att odlas och så vidare. Därtill kan användningen av vissa kemikalier såsom bekämpningsmedel befaras öka. Sammantaget kan den dagliga exponeringen för föroreningar komma att förändras. Det skulle innebära att även utrymmet för exponering av förorening från det förorenade området förändras. Hur stor förändringen skulle bli är dock oklar, men den bedöms ligga inom osäkerhetsmarginalen för respektive värde.

Vid en samlad bedömning av de olika exponeringsvägarna för människor blir slutsatsen att det är två exponeringsvägar som har störst potential att påverkas av klimatförändringen. Dessa är *inandning av damm* och *intag av växter*. Även exponeringsvägen *intag av jord* kan komma att påverkas och kan behöva studeras närmare. Vid vissa objekt skulle även inandning av ångor i byggnader till följd av höjda grundvattennivåer kunna påverkas något. Det är möjligt att även annan exponering kan komma att förändras, men det är mer spekulativt.

3.4.5 Skyddsobjekt i miljön

Skyddsobjekten i miljön har delats in i fem grupper: *markekosystem, grundvatten och grundvattenberoende ekosystem, ytvatten och dess ekosystem, sediment* samt *övriga ekosystem ovan mark*. Dessa diskuteras nedan.

Markekosystem

Markekosystemet, eller markmiljön, avser ekosystemet i jord. Klimatförändringen kan komma att påverka markekosystemet på flera olika sätt, på grund av förändrade abiotiska¹¹ förhållanden. Förändringar i de abiotiska förhållandena kan till exempel komma att påverka i vilken omfattning som organismer exponeras för föroreningar (Schiedek et al., 2007). Exempelvis finns det indikationer på att upptaget av föroreningar i organismer ökar med ökande temperatur (Kennedy & Walsh, 1997). Markekosystemen vid förorenade områden kan därvid vara extra känsliga, åtminstone om ekosystemen redan är stressade på grund av föroreningsförekomst.

Marken som resurs kan lokalt komma att öka i värde vid förorenade områden, i de fall lokal odling ökar som en effekt av klimatförändringen (se *intag av växter* ovan). Det kan innebära ett ökat fokus på att marken vid förorenade områden ska kunna användas för husbehovsodling utan risk. Så är inte alltid fallet idag då förorenade områden exploateras och bebyggs.

Grundvatten och grundvattenberoende ekosystem

Grundvatten som resurs kan komma att bli värdefullare, av olika skäl. Dels kan befintliga grundvattenförekomster öka i betydelse och bli mer skyddsvärda på grund av vattenbrist i vissa regioner, dels kan ökat uttag för bevattning förväntas under torrtider. Båda dessa scenarier leder till att behovet av att skydda grundvattnet från föroreningar ökar.

Grundvattenberoende ekosystem (SGU, 2023) kan även komma att påverkas, om klimatförändringen leder till förändrade grundvattennivåer. I de fall grundvattennivåerna höjs kan förorenat grundvatten strömma ut i nya utströmningsområden och påverka ekosystemen. Storleken på det område som påverkas av utströmmande grundvatten kan alltså komma att öka. De lokala förhållandena kommer att vara avgörande i vilken omfattning ekosystemen påverkas.

Ytvatten och dess ekosystem

Den belastning på ytvatten som förorenad mark ger upphov till förväntas öka i ett förändrat klimat. Det beror främst på föroreningsspredning via erosion, men även via grundvatten och möjligen även via vinderosion. Det skulle kunna leda till vissa negativa effekter på ytvattnet. Samtidigt kan en högre temperatur i ytvattnet vara gynnsamt för nedbrytning av vissa föroreningar. Liksom för grundvatten kommer de lokala förhållandena att vara avgörande för om, och i vilken omfattning, ytvattnet och dess ekosystem påverkas av klimatförändringen.

¹¹ Med abiotiska förhållanden avses icke-levande faktorer som inverkar på ett ekosystem, till exempel pH-värde, närsalter, temperatur, nederbörd och vind.

Förändrade abiotiska förhållanden i ytvattnet kan också ge effekter. Här kan nämnas förändrad salthalt, pH, temperatur etcetera. Bland annat har det påvisats att upptaget av metaller ökar när salthalten i ytvatten sjunker (Lee et al., 1998), vilket skulle kunna bli en effekt i vissa ytvatten. Exakt hur förändrade abiotiska förhållanden påverkar upptaget av föroreningar i organismer är komplicerat och behöver studeras närmare. Föroreningar i ytvattenmiljön kan även spridas uppåt i näringskedjan, vilket skulle kunna ge effekter i ekosystem ovan mark (se nedan).

Sediment

Sediment i ytvatten kan ses som en del av skyddsobjektet ytvatten, men kan också betraktas som ett separat skyddsobjekt. Fördelen med att hantera sediment som ett separat skyddsobjekt är att riskbedömningen blir tydligare när det gäller spridningen via erosion till ytvatten och sediment.

Erosion på det förorenade området leder ofta till partikelbunden transport av föroreningar och när partiklarna når ytvattnet är det endast en del av föroreningen som löses i ytvattnet. Partiklarna som sedimenterar kommer att föra med sig de bundna föroreningarna till sedimenten. På så sätt kan erosion leda till att förorenade sediment byggs upp i ytvattnet nedströms det förorenade området.

Eftersom erosionen förväntas öka i ett förändrat klimat kommer även förorenings-spridningen till sediment sannolikt att öka. Detta är en viktig aspekt att beakta i ett förändrat klimat.

Övriga ekosystem ovan mark

Klimatförändringen förväntas leda till en tydlig påverkan på ekosystem ovan mark. Frågan här gäller hur kombinationen klimatförändring och förorening påverkar ekosystemen. Ovan mark är det flora, fauna, biodiversitet med mera som skulle kunna beröras – gränsdragningen mellan olika ekosystem är diffus och de överlappar delvis.

Om klimatförändringen leder till förändrad artsammansättning skulle riskerna från föroreningen kunna förändras, men antagligen i begränsad omfattning. Ekosystemet skulle möjligen kunna påverkas om arter som är mer känsliga för föroreningar blir vanligare, men också genom att arter som är känsligare för föroreningar lättare slås ut. Ytterligare en effekt kan vara så kallad sekundärförgiftning och spridning av föroreningar i näringsväven. Om klimatförändringen gynnar primärkonsumenter (växtätare) skulle spridningen via dessa till sekundärkonsumenter (köttätare) kunna öka. Detta skulle kunna påskynda spridningen av miljögifter i naturen.

Samlad bedömning för skyddsobjekten i miljön

Generellt skulle klimatförändringen kunna leda till att vissa medier, som jord och grundvatten, får ett större värde och därmed blir mer skyddsvärda. De lokala förhållandena kommer att vara avgörande för hur stor denna effekt blir.

En ökad föroreningsbelastning på ytvatten och sediment kan förväntas i ett förändrat klimat. Klimatförändringens effekter på andra skyddsobjekt i miljön är mer osäkra.

3.4.6 Övriga skyddsobjekt

I Naturvårdsverkets modell (Naturvårdsverket, 2009a) ingår skyddsobjekten människa, markmiljö, grundvatten och ytvatten. I avsnittet ovan diskuteras även sediment och ekosystemen ovan jord. Finns det ytterligare skyddsobjekt som klimatförändringen kan påverka ur föroreningsynpunkt? Ja, en sådan typ av skyddsobjekt är gamla förorenade områden och gamla deponier som redan tidigare har åtgärdats och där en eller flera tekniska konstruktioner använts i åtgärdslösningen. Det kan gälla gamla deponier med täckskikt, dränerings- och dikessystem som dimensionerats för vissa flöden, markfilter med mera. SGI har tidigare identifierat gamla soptippar som ett exempel på objekt som är särskilt utsatta i ett förändrat klimat (Nilsson et al., 2005).

Det är alltså inte säkert att gamla skydds konstruktioner har dimensionerats för de klimatscenarier som nu är aktuella. Riskerna vid sådana objekt skulle alltså kunna öka, exempelvis på grund av erosion eller andra processer som påverkas av klimatet. Redan åtgärdade objekt kan därför behöva ses över.

I USA har en modell som bygger på klimathänsyn arbetats in i efterbehandlingssystemet (Branzén, 2023). Modellen tillämpas förutom på nya efterbehandlingsobjekt även på färdigsanerade objekt där förorening har lämnats kvar. Det innebär att en periodisk revidering görs av sådana objekt. Sverige saknar ett liknande system. Däremot kan det finnas kontrollprogram som löper för vissa objekt. Huruvida sådana kontrollprogram inbegriper effekter orsakade av klimatförändringen är mer tveksamt. Detta är något som kan behöva undersökas närmare.

Det finnas även infrastruktur och konstruktioner som kan påverkas av vissa typer av föroreningar, som salter och föroreningar med extrema pH-värden. I princip skulle sådana konstruktioner kunna utgöra skyddsobjekt. Riskerna för sådana objekt är dock helt och hållet platsspecifika och berörs inte närmare här.

3.4.7 Bedömning och hantering i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell

Exponeringsvägar för människor

De mest relevanta exponeringsvägarna för människor hanteras redan idag i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell. Det finns knappast något behov av att komplettera modellen med ytterligare exponeringsvägar för att beakta ett förändrat klimat. Däremot kan det vara befogat att beakta även andra exponeringsvägar vid platsspecifika bedömningar.

De parametrar som idag används för respektive exponeringsväg i modellen bedöms vara lämpliga även i ett förändrat klimat. Denna slutsats bygger på att den osäkerhet som finns om klimatets påverkan på enskilda parametrar bedöms inrymmas under de allmänna osäkerheterna i exponeringsmodellerna. En översyn bör dock göras när kunskapen om klimatförändringens effekter blivit större. De exponeringsvägar som ligger närmast till hands att se över är intag av växter, inandning av damm och eventuellt även oralt intag av jord samt inandning av ånga.

Skyddsobjekt i miljön

De skyddsobjekt i miljön som idag hanteras i Naturvårdsverkets riktvärdesmodell bedöms vara relevanta även in ett förändrat klimat. Det finns dock behov av några kompletteringar och justeringar.

Grundvatten och grundvattenberoende ekosystem

Ett förändrat klimat förväntas leda till förändrade grundvattennivåer. Det kommer i sin tur att leda till förändringar i in- och utströmningsområden för grundvatten.

Ekosystemen i utströmningsområden är grundvattenberoende och därför kan det vara befogat att använda begreppet ”grundvattenberoende ekosystem”, se SGU (2023). Detta är en aspekt som kan behöva förtydligas i Naturvårdsverkets vägledningsmaterial om förorenade områden. Då flyttas fokus från grundvatten som enbart en vattentillgång för människor, till den nytta som grundvattnet har i ekosystemet.

Sediment

Eftersom förorenings spridning via erosion bedöms få ökad betydelse vid ett förändrat klimat, är det befogat att komplettera modellen med skyddsobjektet sediment. Då krävs även en spridningsmodell som kopplar samman föroreningskällan (den förorenade marken) och skyddsobjektet (sedimentet). Detta bör utredas.

4 Klimateffekter i avhjälpandeprocessen

4.1 Moment i processen

Processen för att avhjälpa föroreningsskador beskrivs av Naturvårdsverket (2024a) och kan delas in i ett antal moment och delmoment. Klimatrelaterade effekter vid förorenade områden kan uppstå som behöver hanteras i flera delmoment i avhjälpandeprocessen. I denna rapport ligger dock tyngdpunkten på riskerna som föroreningen ger upphov till, vilket motsvarar skedet riskbedömning och som diskuterats i kapitel 3. Under arbetet med denna rapport har vi dock noterat klimatrelaterade risker som berör även andra moment och som vi därför vill nämna. Dessa har samlats i detta kapitel där vi kortfattat berör momenten *övergripande åtgärds mål, undersökning, riskbedömning, åtgärdsutredning, riskvärdering* och *åtgärdernas genomförande*. Riskbedömningen har tidigare diskuterats i kapitel 3, men i kapitel 4 görs en kortfattad beskrivning av vad man bör tänka på vid riskbedömningar i ett förändrat klimat.

Som tidigare har nämnts finns det givetvis fler aspekter än de som tas upp i denna förstudie.

4.2 Övergripande åtgärds mål

I ett klimat som förändras behöver de övergripande åtgärds målen formuleras på ett sådant sätt att klimatförändringens effekter beaktas. Ett exempel är att riskerna efter åtgärd ska vara acceptabla även efter kraftiga skyfall. Detta och liknande exempel är särskilt viktiga att beakta i brant och sluttande terräng (erosion), nära sjöar, hav och vattendrag (erosion, ras, skred, översvämning, urtvättning, belastning med mera), områden med särskilt känslig växlighet eller tunna jordtäckan och så vidare.

Ett sätt att fånga upp klimatförändringens effekter i de övergripande åtgärds målen är att upprätta en checklista över aspekter som ska beaktas när de övergripande åtgärds målen formuleras. En punkt på en sådan checklista bör vara klimatförändringen och dess effekter.

4.3 Undersökningar

Ett förändrat klimat kan ställa något andra krav på de undersökningar som behöver göras vid förorenade områden. Det kan handla om allt från nivåmätningar i yt- och grundvatten till upptag av förorening i växter. Frågeställningarna är dock platsspecifika och det är tveksamt om det går att dra några generella slutsatser om hur undersökningsskedet kan komma att påverkas.

En helt annan effekt av klimatförändringen är att själva undersökningen kan försvåras på grund av väderleken. Klimatförändringen leder till ökad frekvens av extremväder, som kan skada avancerad och känslig utrustning (Branzén, 2023). Kraftig nederbörd med mera kan även leda till andra problem, exempelvis problem att mäta porgashalter i mark (Back et al., 2016b). Detta är två exempel, men det finns flera andra praktiska problem som kan uppstå.

4.4 Riskbedömning

Naturvårdsverket (2024c) skriver följande:

Naturvårdsverket anser att en utredning om det föreligger klimatrelaterade risker bör utföras inom ramen för riskbedömningen. Utredningen bör utgöra underlag för utformning av åtgärder och återställning.

Det är alltså uppenbart att det förändrade klimatet ska beaktas vid riskbedömning av förorenade områden.

Genomgången i kapitel 3 har visat att klimatförändringen kan påverka riskerna vid förorenade områden på flera olika sätt, men att osäkerheterna är stora. För att underlätta riskbedömningen kan det därför vara till hjälp att ställa en del frågor med koppling till klimatförändringen. Några sådana hjälpfrågor är:

- Hur kommer föroreningskällan att påverkas av klimatförändringen?
- Hur kommer föroreningarnas frigörelse och spridning att påverkas?
- Hur kommer människans exponering att påverkas?
- Vilka övriga skyddsobjekt finns och hur påverkas dessa?
- Hur kommer belastningen på recipienten att påverkas?

För att besvara dessa frågor kan kapitel 3 vara till hjälp. Osäkerheterna kommer att vara stora för vissa frågor, medan andra kan besvaras lättare. I kapitel 6 rekommenderas ett antal åtgärder som syftar till att minska osäkerheterna, så att säkrare bedömningar ska kunna göras framöver.

4.5 Åtgärdsutredning

I ett förändrat klimat kan efterbehandlingsåtgärderna behöva anpassas för att de ska klara av att uppfylla åtgärds målen. Åtgärderna måste uppnå en tillräcklig riskreduktion även vid kraftiga skyfall, översvämning, förändrade nivåer i yt- och grundvatten med mera. Därför är det mycket viktigt att ett förändrat klimat beaktas när olika åtgärdsalternativ utreds. Åtgärdsalternativen måste uppnå tillräcklig riskreduktion för både människor och miljön även när extrema väderhändelser blir vanligare.

Några exempel där climateffekterna är särskilt viktiga att beakta är:

- Åtgärder i sluttningar, där ytavrinning kan orsaka kraftig erosion.
- Samtliga åtgärder som innebär att förorening lämnas kvar på platsen (risk för erosion, ökad utlakning med mera).
- Åtgärder som kräver instrumentering över lång tid (risk för skador på instrument på grund av klimathändelser).

Befintlig vägledning för åtgärdsutredning (Naturvårdsverket, 2009c) nämner förändrat klimat som en faktor som behöver beaktas.¹² En mer utvecklad vägledning i dessa frågor behöver dock tas fram.

¹² Se "Åtgärdernas beständighet" (avsnitt 5.4.4) i Naturvårdsverket (2009c).

4.6 Riskvärdering

I riskvärderingen vägs olika typer av aspekter mot varandra, främst effekter av de olika åtgärdsalternativen. Den inverkan som ett förändrat klimat kan komma att ha måste därför beaktas. Hur olika effekter bedöms och värdesätts kan komma att ändras något i ett förändrat klimat. Till exempel kan grundvattenresurser i områden som återkommande drabbas av torka värderas annorlunda än idag. Exakt hur ett förändrat klimat kan komma att påverka de värderingar som görs i en riskvärdering är dock svårt att prognosticera.

Vid många förorenade områden är det befogat att ha med klimatförändringen som en aspekt i riskvärderingen. I SGI:s vägledning om riskvärdering (SGI, 2022) finns ett avsnitt¹³ där dessa frågor diskuteras. Där beskrivs hur ett förändrat klimat kan hanteras i en riskvärdering. Tre olika angreppssätt för att göra detta diskuteras i vägledningen.

Inför val av saneringsåtgärd i USA används ett antal kriterier för att utvärdera olika åtgärdslösningar. Klimatförändringen ska beaktas i fem av dessa: (1) människors hälsa och miljön, (2) åtgärdens långsiktiga effektivitet och prestanda, (3) reduktion och toxicitet, mobilitet eller volym genom behandlingen, (4) kortsiktig effektivitet samt (5) genomförbarhet (Branzén, 2023). Erfarenheter från USA visar att synliggörandet av klimatfrågorna kan ge en trygghet i projekt, även då själva åtgärdslösningen inte påverkas. Andra gånger kan klimatfrågan ha en avgörande betydelse, kanske till och med styra valet av åtgärd (Branzén, 2023).

4.7 Åtgärdernas genomförande

I USA finns det en hel del erfarenhet av hur klimatet kan påverka efterbehandlingsåtgärdernas genomförande och funktion. Orsaken till detta är att landet sedan lång tid varit utsatt för återkommande extremväder i form av kraftiga stormar, översvämningar och bränder. För en genomgång av lärdomarna från USA hänvisas till Branzén (2023). En slutsats i rapporten är att climateffekter har beaktats under lång tid i USA och att kunskapen därför hunnit mogna. Idag finns det därför en förhållandevis god insikt om vilka risker ett klimat i förändring kan innebära för förorenade områden.

I Sverige saknas i stort sett vägledning om hur climateffekter ska beaktas då efterbehandlingsåtgärder genomförs. Naturvårdsverket (2024b) tar dock upp frågan i en webbaserad vägledning om förorenade områden i ett förändrat klimat. Där ges några exempel på hur efterbehandlingsåtgärderna kan behöva anpassas för att hantera klimatriskerna. Det kan exempelvis handla om hantering av större volymer vatten vid länshållning, högre sponter för att hålla vatten utanför åtgärdsområdet eller att återfylla till högre nivå för att undvika framtida översvämning.

Eftersom det saknas en tydlig vägledning i dessa frågor i Sverige är det önskvärt att en sådan tas fram. Lämpligen kan lärdomar från andra länder, exempelvis USA, utnyttjas och anpassningar göras till svenska förhållanden.

¹³ Avsnitt 4.3 i SGI (2022).

5 Slutsatser

Den pågående klimatförändringen medför att temperaturen, nederbörden, vattentillgången, vattennivåerna med mera ändras. Detta ger i sin tur upphov till förändringar i olika markprocesser, föroreningsspridning och föroreningstransport samt risker för människor och miljö. Klimatförändringens effekter berör flera av momenten i avhjälpandeprocessen. De viktigaste slutsatserna i rapporten är följande:

- Klimatförändringen har potential att påverka vissa processer i marken där föroreningen finns. Även om osäkerheterna är stora förväntas effekterna bli små i de flesta fall, även om det kan finnas undantag.
- De risker som människor utsätts för vid förorenade områden kan komma att förändras något, men antagligen i mindre omfattning. De exponeringsvägar för föroreningar som främst kan komma att påverkas är intag av växter och inandning av damm samt möjligen även intag av jord och inandning av ånga. Förändringarna bedöms bli små, även om det kan finnas undantag.
- Det är inte enbart förändringar i nederbörd, temperatur, markprocesser och andra fysikaliska aspekter som påverkar riskerna för människor utan även förändrade beteenden. Sådana beteendeförändringar är svåra att prognosticera, men kan vara betydelsefulla ur risksynpunkt.
- I ett förändrat klimat kan spridningen av föroreningar från förorenade områden komma att öka. De viktigaste orsakerna till detta bedöms vara utlakning till följd av ökad nederbörd samt erosion, främst via ökad ytavrinning. Även föroreningstransporten via grundvatten bedöms kunna öka.
- Vi har identifierat att det finns ett behov av att komplettera Naturvårdsverkets modell för beräkning av riktvärden. Slutsatsen i denna rapport är att modellen bör kompletteras med spridningsvägen erosion via ytavrinning samt skyddsobjektet sediment. Rapportens bilaga 1 kan vara en utgångspunkt för erosion som spridningsväg.
- I vissa specifika fall kan klimatförändringen leda till att skyddsvärden i miljön förändras, till exempel att vissa resurser eller områden blir mer skyddsvärda än idag. Ett sådant exempel är grundvattenmagasin i områden som kan komma att få vattenbrist.
- Osäkerheterna är stora om hur riskerna kommer att förändras vid förorenade områden. Det gör det mindre motiverat med detaljerade beräkningar eller simuleringar. Det kan vara lämpligare att studera hur riskerna påverkas vid olika scenarier (klimatscenarier, beteendeförändringar med mera), för att på så sätt skapa en bättre förståelse för klimatförändringens inverkan på riskerna i det enskilda fallet.
- Det är befogat att ta hänsyn till klimatförändringen vid val och utformning av åtgärder redan idag.

- Klimatförändringen kan påverka redan efterbehandlade områden där förorening har lämnats kvar. Detta kan ske genom erosion av täckskikt och barriärer, förändrade flödesvägar med mera. Därför kan det vara befogat med uppföljning och översyn av sådana objekt.
- Det krävs mer vägledning om hur olika typer av risker vid förorenade områden bör hanteras i ett förändrat klimat. Vägledning behövs i flera moment i avhjälpandeprocessen, se kapitel 4.

6 Rekommendationer

Denna förstudie har visat att det finns kunskapsluckor och osäkerheter om riskerna vid förorenade områden i ett förändrat klimat. Med utgångspunkt i tidigare kapitel lämnas här ett antal förslag till fortsatt arbete. Syftet är att reducera osäkerheterna och att komplettera verktyg och vägledningar, så att klimatförändringens effekter vid förorenade områden lättare kan hanteras.

Följande rekommenderas:

- I SGI:s senaste klimat- och sårbarhetsanalys (SGI, 2024b) dras slutsatsen att det finns ett behov av ökad kunskap om spridningsprocesserna samt den betydelse som skyfall, ihållande regn, översvämningar och ökad grundvattenbildning har för spridning av föroreningar från förorenade områden. Litteraturstudier, kunskapssammanställningar och andra utredningar bör därför göras för de aspekter som är särskilt viktiga, men osäkra. Det gäller till exempel olika typer av vattenerosion, vinderosion och förorenings-spridning via damm.
- Förorenings-spridning genom erosion via ytavrinning bedöms bli särskilt betydelsefullt i ett förändrat klimat. Denna spridningsväg förväntas även leda till ansamling av förorening i sediment nedströms det förorenade området. Därför bör Naturvårdsverkets riktvärdesmodell kompletteras med spridningsvägen erosion via ytavrinning och skyddsobjektet sediment.¹⁴ Rapportens bilaga 1 kan vara en utgångspunkt i ett sådant arbete. I ett senare skede, när klimatförändringens effekter säkrare kan bedömas, bör en större översyn av riktvärdesmodellen göras, där även exponeringsvägarna utreds.
- I ett förändrat klimat kan belastningen på ytvatten komma att öka. Dels kan en större andel av belastningen förväntas ske via erosion, dels kan variationen över tid bli större än idag. Båda dessa aspekter innebär mät- och beräkningstekniska problem. Metoder för att mäta och beräkna belastningens storlek kan därför behöva utvecklas. En utgångspunkt i ett sådant arbete kan vara den belastningsrapport som SGI har tagit fram (Fröberg et al., 2021).
- Vägledning till branschen om klimatförändringens effekter vid förorenade områden bör tas fram. Lämpligen kan lärdomar från andra länder utnyttjas och anpassningar göras till svenska förhållanden. Ytterligare vägledning behövs i flera av momenten i avhjälpanprocessen (se kapitel 4), bland annat övergripande åtgärds-mål, riskbedömning, åtgärdsutredning och åtgärdernas genomförande. Checklistor kan behöva tas fram, som stöd för tillsynsmyndigheter och andra.

¹⁴ Ytterligare ett argument för att inkludera erosion och skyddsobjektet sediment är signalvärdet. Genom att inkludera dessa sänds en signal till branschen om att dessa aspekter är något som i princip alltid ska beaktas. Om dessa däremot saknas, blir signalen att erosion och spridning till sediment inte förväntas vara ett generellt problem.

- Klimatförändringen kan påverka redan efterbehandlade objekt där föroreningar lämnats kvar, till exempel genom erosion av täckskikt och barriärer samt förändrade flödesvägar (se även Nilsson et al., 2005). Sådana objekt kan kräva en översyn, för att kontrollera att de klarar av klimatförändringens effekter. Sverige saknar dock system för uppföljning av redan efterbehandlade objekt där föroreningar har lämnats kvar. I vilken form en sådan uppföljning bör utföras kan därför behöva utredas. För vissa objekt kan det finnas kontrollprogram som löper. Det är tveksamt om kontrollprogrammen inbegriper effekter orsakade av klimatförändringen. Även detta är något som kan behöva undersökas närmare.

Referenser

- Aastrup, M., Thunholm, B., Sundén, G. & Dahné, J., 2012. Klimatets påverkan på koncentrationer av kemiska ämnen i grundvatten, SGU-rapport 2012:27, Sveriges geologiska undersökning, Uppsala
- ASCWG, 2006. Three- and Four-Phase Partitioning of Petroleum Hydrocarbons and Human Health Risk Calculations - Technical Background Document and Recommendations, Alaska Statement of Cooperation Working Group.
- Back, P. E., Enell, A., Fransson, M., Hermansson, S., Rosén, L., Volchko, Y., Wiberg, K. & Åberg, A., 2016a. Markmiljöns skyddsvärde. En härledning med utgångspunkt i miljöetik och lagstiftning. SGI Publikation 27, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.
- Back, P. E., Pettersson, M., Berggren Kleja, D., Ohlsson, Y. & Carling, M., 2016b. PAH i porgas. Provtagning, modellering och övergripande metodik vid riskbedömning. SGI och Karlstads kommun. Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.
- Berggren Kleja, D., Elert, M., Gustafsson, J. P., Jarvis, N. & Norrström, A. C., 2006. Metallerens mobilitet i mark, Rapport 5536, Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering, Naturvårdsverket, Stockholm
- Bernes, C., 2016. En varmare värld - Växthuseffekten och klimatets förändringar, Upplaga 3, Monitor 23, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Biswas, B., Qi, F., Biswas, J. K., Wijayawardena, A., Khan, M. A. I. & Naidu, R., 2018. The fate of chemical pollutants with soil properties and processes in the climate change paradigm - A review, *Soil Syst*, 2, 51
- Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L. & Panagos, P., 2017. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. *Land Degr. Develop.*, 28, 335-344.
- Branzén, H., 2023. Efterbehandling och klimatförändring, Översiktlig litteraturgenomgång – Utblick USA. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.
- Carlsson, L. & Gustafsson, G., 1984. Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik, R41:1984, Bygghälsökningsrådet, Stockholm
- Christensen, O. B., Kjellström, E., Dieterich, C., Gröger, M. & Meier, H. E. M., 2022. Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 133–157. <https://doi.org/10.5194/esd-13-133-2022>
- Cihacek, L. J., Anderson W. L. & Barak, P. W., 1996. Linkages between Soil Quality and Plant, Animal, and Human Health. *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication 49, Soil Science Society of America, Madison.
- Danielsson, P., Kling, J., Rydell, B., & Kiilgaard, R., 2016. Naturanpassade erosionsskydd i vattendrag - En förstudie, SGI Publikation 28, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.

- De Munck, C. S., Hutchings, T. R. & Moffat, A. J., 2008. Impacts of climate change and establishing a vegetation cover on water erosion of contaminated spoils for two contrasting United Kingdom regional climates: A case study approach, *Integr. Environ. Assess. Manag.*, 4(4), 443-455.
- Djodjic, F. & Markensten, H., 2019. From single fields to river basins: Identification of critical source areas for erosion and phosphorus losses at a high resolution. *Ambio* 48(10), 1129-1142.
- Edebalk, P., Carling, M., Göransson, G., Fallsvik, J., Hedfors, J., Odén, K., Branzén, H. & Stark, M., 2016. Riskbedömning av förorenade områden med hänsyn till sårbarhet för naturolyckor. Information och råd, SGI Publikation 20, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Eklund, A., Mårtensson, J. A., Bergström, S., Björck, E., Dahné, J., Lindström, L., Nordborg, D., Olsson, J., Simonsson, L. & Sjökvist, E., 2015. Sveriges framtida klimat. Underlag till Dricksvattenutredningen, Klimatologi Nr 14, SMHI
- Fröberg, M., Wernersson, A. S., Hermansson, S. & Bengtsson, H., 2021. Bedömning av förorenade områdens belastning på yt- och grundvatten, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.
- Gatto, M. P., Cabella, R. & Gherardi, M., 2016. Climate change - the potential impact on occupational exposure to pesticides, *Ann Ist Super Sanità*, 52(3), 374-385.
- Green, W. H. & Ampt, G. A., 1911. Studies of soil physics Part 1: The flow of air and water through soils, *J. Agric. Sci.*, 4, 1-24.
- Gelybó, G., Tóth, E., Farkas, C., Horel, Á., Kása, I., & Bakacsi, Z. (2018). Potential impacts of climate change on soil properties. *Agrokémia És Talajtan Agrokem*, 67(1), 121–141. <https://doi.org/10.1556/0088.2018.67.1.9>
- Hernebring, C., Dahlström, B. & Kjellström, E., 2012. Regnintensitet i Europa med fokus på Sverige – ett klimatförändringsperspektiv, Rapport Nr 2012–16, Svenskt Vatten Utveckling.
- Hernebring, C., Dahlström, B. & Kjellström, E., 2018. Regnintensitet i ett förändrat klimat i Sverige med data tillgängliga för användare, SVU-projekt 04-14, Svenskt Vatten Utveckling.
- Hopkins, D. W. & Gregorich, E. G., 2013. Managing the soil-plant system for the delivery of ecosystem services, In: *Soil conditions and plant growth*, Eds P. Gregory & S. Nortcliff, 390-416, Chichester: Wiley-Blackwell.
- Hågvar, S., 1998. The relevance of the Rio-Convention on biodiversity to conserving the biodiversity of soils. *Appl. Soil Ecol.*, 9(1-3), 1-7.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- IPCC, 2023. Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://doi.org/doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jarsjö, J., Andersson-Sköld, Y., Fröberg, M., Pietrón, J., Borgström, R., Kristofferson, Å. & Berggren-Kleja, D., 2019. Projecting impacts of climate change on metal mobilization at contaminated sites: Controls by the groundwater level, *Sci. Total Environ.*, 712, 135560.
- Kennedy, C. J. & Walsh, P. J., 1997. Effects of temperature on xenobiotic metabolism. In: Wood, C.M., McDonald, D.G. (Eds.), *Global Warming – Implications for Freshwater and Marine Fish*. Cambridge University Press, pp. 303–324
- Kjellström, E., Andersson, L., Arneborg, L., Berg, P., Capell, C., Fredriksson, S., Hieronymus, M., Jönsson, A., Lindström, L & Strandberg, G., 2022. Klimatinformation som stöd för samhällets klimatanpassningsarbete, *Klimatologi* Nr 64, SMHI.
- Laudon, H., Buttle, J., Carey, S. K., McDonnell, J., McGuire, K., Seibert, J., Shanley, J., Soulsby, C. & Tetzlaff, D., 2012. Cross-regional prediction of long-term trajectory of stream water DOC response to climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L18404
- Laudon H. & Bishop, K., 2001. Kalkas norrländska vatten i onödan? – främst naturliga orsaker till sur vårflod. Fakta skog nr 1 2001, SLU.
- Lee, B-G., Wallace, W. G. & Luoma, S. N., 1998. Uptake and loss kinetics of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Poamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: effects of size and salinity, *Marine Ecology – Progress Series* 175, 177–189.
- Lipczynska-Kochany, E., 2018. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review, *Sci. Total Environ.* 640, 1548-1565
- Magalhães, M. C. F., 2002. Arsenic – An environmental problem limited by solubility, *Pure Appl. Chem.* 74(10), 1843-1850
- Mein, R. G. & Larson, C. J., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.*, 9(2), 384-394.
- Naturvårdsverket, 1999. Metodik för inventering av förorenade områden, Rapport 4918, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Naturvårdsverket, 2009a. Riktvärden för förorenad mark. Modellbeskrivning och vägledning. Rapport 5976, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Naturvårdsverket, 2009b. Riskbedömning av förorenade områden. En vägledning från förenklad till fördjupad riskbedömning. Rapport 5977, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Naturvårdsverket, 2009c. Att välja efterbehandlingsåtgärd. En vägledning från övergripande till mätbara åtgärds mål. Rapport 5978, Naturvårdsverket, Stockholm.

Naturvårdsverket, 2016a. Klimatförändringen och miljömål, Rapport 6705, Naturvårdsverket, Stockholm.

Naturvårdsverket, 2022. Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark www.naturvardsverket.se/49f2f8/globalassets/vagledning/fororenade-omraden/riktvarden/naturvardsverkets-generella-riktvarden-fororenad-mark-tabell-ver2-2-2024.pdf [Hämtad: 2024-10-02]

Naturvårdsverket, 2024a. *Att välja efterbehandlingsåtgärd – Avhjälpan av förorenings-skada*. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/fororenade-omraden/att-valja-efterbehandlingsatgard/avhjalpande-av-fororeningsskada/> [Hämtad: 2024-09-06].

Naturvårdsverket, 2024b. *Förorenade områden i ett förändrat klimat*. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/fororenade-omraden/fororenade-omraden-i-ett-forandrat-klimat/> [Hämtad: 2024-09-10].

Naturvårdsverket, 2024c. *Utgångspunkter för avhjälpan av förorenade områden*. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/fororenade-omraden/att-valja-efterbehandlingsatgard/utgangspunkter-for-avhjalpande-av-fororenade-omraden/> [Hämtad: 2024-09-25].

Naturvårdsverket, 2024d. *Riskklassade förorenade områden*. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/fororenade-omraden/fororenade-omraden/> [Hämtad: 2024-07-04].

Nilsson, G., Rosqvist, H., Andersson-Sköld, Y., Starzec, P. & Norrman, J., 2005. Förorenings-spridning - Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat. Deluppdrag 3, SGI Varia 560:3, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.

Ohlsson, Y., Back, P. E. & Vestin, J., 2014. IMAHg - Enhanced knowledge in mercury fate and transport for Improved Management of Hg soil contamination, Risk Assessment of Mercury Contaminated Sites, Project No. SN-03/08, SNOWMAN Network.

Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L. & Yang, W., 2017. Extremregn i nuvarande och framtida klimat. Analyser av observationer och fram-tidsscenarioer, Klimatologi Nr 47, SMHI.

Olsson, J. & Foster, K., 2013. Extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige, Klimatologi Nr 6, SMHI

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L. & Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, Environ. Sci. Policy, 54, 438-447.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C., 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Agricultural handbook 703, US Department of Agriculture (USDA), Washington DC.

- Rengel, Z., 2011. Soil pH, soil health and climate change. In *Soil Health and Climate Change*; Singh, B.P., Cowie, A.L., Chan, K.Y., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 69–85
- Rossmann, L. A. & Huber, W. C., 2016. Storm water management model reference manual. Volume 1 – Hydrology (Revised), EPA/600/R-15/162A, US. EPA Office of Research and Development, Washington DC.
- Schiedek, D., Sundelin, B., Readman, J. W. & MacDonald, R. W., 2007. Interactions between climate change and contaminants, *Mar. Pollut. Bull.*, 54(12), 1845-1856.
- SGI, 2020. Hållbart markbyggnad – en handlingsplan i ett förändrat klimat 2021-2025, SGI Vägledning 3, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping
- SGI, 2022. Riskvärdering vid förorenade områden, Arbetsgång för hållbara åtgärder. SGI Vägledning 7, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.
- SGI, 2024a. Erosion. <https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/vad-ar-erosion/> [Hämtad: 2024-10-31]
- SGI, 2024b. Klimat- och sårbarhetsanalys, för Statens geotekniska institut, Gd-stab, 2024-06-27, Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.
- SGI och MSB, 2021. Riskområden för ras, skred, erosion och översvämning, Redovisning av regeringsuppdrag enligt regeringsbeslut M2019/0124/Kl. Statens geotekniska institut (SGI) och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
- SGU, 2013. Bedömningsgrunder för grundvatten, SGU-rapport 2013:01, Sveriges geologiska undersökning, Uppsala.
- SGU, 2023. *Grundvattenberoende ekosystem*. Sveriges geologiska undersökning. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/planering-och-markanvandning/grundvatten-i-planeringen/grundvattenberoende-ekosystem/> [Hämtad: 2024-09-20].
- SGU, 2024. *Grundvattnets temperatur ökar*. SGU. <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvatten-och-forandrat-klimat/grundvattnets-temperatur-okar/> [Hämtad: 2024-07-04].
- Skogen.se, 2024. Marktemperatur, <https://www.skogen.se/glossary/marktemperatur/> [Hämtad 2024-10-31]
- Skyllberg, U., Drott, T., Lambertsson, L. & Björn, E., 2006. Förbättrad riskbedömning av kvicksilverförorenade sediment, Rapport 5629, Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering, Naturvårdsverket, Stockholm
- SLU, 2019. Marktemperatur, <http://www.vaxten.slu.se/marken/marktemperatur.htm> [Hämtad: 2019-12-04]
- Smedley, P. L. & Kinniburgh, D. G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *Appl. Geochem.*, 17, 517-568

SMHI, 2023. *Hur klimatet förändras – Vind*. SMHI.

<https://www.klimatanpassning.se/hur-klimatet-forandras/klimat effekter/vind-1.21290>

[Hämtad: 2024-09-20].

SMHI, 2024. *Enkel klimatscenariotjänst*. SMHI.

<https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/enkel-scenariotjanst?l=null> [Hämtad:

2024-07-04].

SOU, 2015. Klimatförändringar och dricksvattenförsörjning, SOU 2015:51, Statens offentliga utredningar

van Dijk, J., Koenders, M., Rebel, K., Schaap, M & Wassen, M., 2009. State of the art of the impact of climate change on environmental quality in The Netherlands – A framework for adaptation, Knowledge for Climate, KfC report No. KfC 006/09.

Warkentin, B. P., 1995. The changing concept of soil quality. *J. Soil Water Conserv.*, 50(3), 226-228.

Wischmeier, W. & Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, Agricultural handbook 537, US Department of Agriculture (USDA), Washington DC, USA.

Bilaga – Erosion via ytavrinning

1. Förutsättningar för erosion med vatten

Erosion med vatten sker bland annat när vatten rinner av uppe på markytan. Detta sker om vatten inte kan infiltrera i marken, utan i stället börjar rinna uppe på markytan. Det i sin tur kräver att marken antingen är helt vattenmättad ända upp till markytan (att grundvattenytan ligger vid markytan) eller att markens infiltrationskapacitet överskrids (att mer vatten når marken per tidsenhet än den mängd som kan infiltrera i marken). I Sverige är ytavrinning i allmänhet vanligast i samband med snösmältningen, eftersom tjälen då gör att marken är svårgenomtränglig, samtidigt som det tillförs stora mängder vatten under lång tid (Djodjic & Markensten, 2019).

Markens förmåga till infiltration är nära relaterad till den mättade hydrauliska konduktiviteten hos marken. Mark med grövre textur har alltså högre infiltrationskapacitet än fintexturerad jord. Det finns olika metoder för att beskriva hur infiltrationskapaciteten förändras under ett nederbördsförlopp. Ett sätt är Hortons ekvation:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt}$$

där f_0 (mm/h) är den initiala infiltrationskapaciteten och f_c (mm/h) är den slutliga infiltrationskapaciteten när regnet har pågått ett tag (nära besläktad med den mättade hydrauliska konduktiviteten). Den empiriska konstanten k (h^{-1}) beskriver hur snabbt infiltrationskapaciteten förändras med tiden.

För sandiga jordar utan vegetation används i USEPAs Storm Water Management Model (Rossman & Huber, 2016) ett värde på f_0 på 5 inches/h = 127 mm/h. För f_c används samma värde som mättad hydraulisk konduktivitet, se till exempel Carlsson & Gustafsson (1984). Typiska värden på k är 3-6 h^{-1} (Rossman & Huber, 2016).

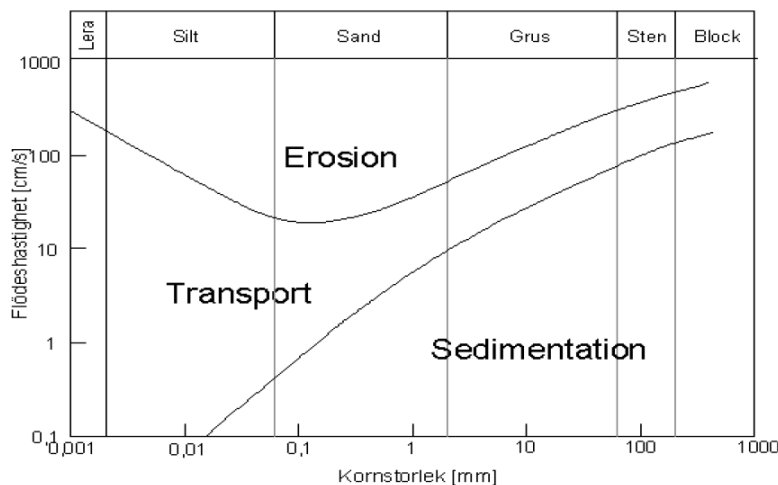
En annan metod som används flitigt för att beräkna infiltration är Green-Ampts metod (Green & Ampt, 1911) ofta med Mein-Larssons modifierade version (Mein & Larsson, 1973). Denna ekvation är helt mekanistisk och infiltrationen beskrivs som ett mättat vertikalt flöde. Green och Ampt antog att man har mättade förhållanden vid ytan och att den underliggande omättade jorden suger vatten nedåt genom kapillära krafter, vilket gör att infiltrationsflödet blir något högre än vad den mättade hydrauliska konduktiviteten motsvarar. Detta uttrycks genom ekvationen:

$$f = K_s \cdot \frac{h_f - h_0}{Z_f}$$

där K_s är mättad hydraulisk konduktivitet, $h_f - h_0$ är skillnaden i vattnets hydrauliska potential (lägespotential + tryckpotential) mellan vätningsfronten och markytan och Z_f är avståndet mellan markytan och vätningsfronten. Denna ekvation är alltså analog med beräkningen av Darcy hastighet, som också beräknas genom att multiplicera den mättade hydrauliska konduktiviteten med den hydrauliska gradienten.

Principen för när erosion kan ske är att skjuvspänningen, som vattenflödet ger upphov till, måste överskrida den kritiska skjuvspänningen för att sätta markpartiklarna i rörelse. Det vill säga att kraften i det framströmmande vattnet måste vara tillräckligt stor för att markpartiklarna ska börja röra på sig. En viktig faktor för erosion med vatten är därför hur snabbt vatten avrinner på markytan. Högre hastighet ger större skjuvkraft och därmed kraftigare erosion. Vattenhastigheten är i sin tur beroende av hur mycket marken lutar och hur stor friktionen mot markytan är. Ett vegetationstäckes ger till exempel hög friktion och hindrar därmed att höga vattenhastigheter uppkommer, vilket effektivt motverkar erosion.

Sand och silt är de mest erosionsbenägna fraktionerna. Att lerpartiklar har lägre benägenhet för erosion beror på att kohesionskrafterna mellan lerpartiklarna håller ihop jorden bättre och alltså ökar den kritiska skjuvspänningen, vilket illustreras i Figur B-1.



Figur B-1 Hjulströms diagram visar dominerande processer vid olika vattenhastigheter och kornstorlekar hos jordmaterialet (Danielsson et al., 2016).

2. Kvantifiering av erosion

Erosionen, och den spridning av föroreningar som denna kan orsaka, är svår att skatta genom fältmätningar, inte minst eftersom den sker under korta perioder. Det kanske endast är vid ett fåtal tillfällen per år, eller ännu mer sällan, som erosionen blir så kraftig att den har någon egentlig betydelse för föroreningsspridningen.

Det finns dock olika metoder och modeller för att skatta erosionens storlek. Inom jordbruket, men även inom andra områden, används sedan lång tid tillbaka en modell som kallas Universal Soil Loss Equation, USLE (Wischmeier & Smith, 1978). Senare har liknande varianter av USLE använts för att beräkna erosionsförluster. Den idag mest använda modellen är Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE (Renard et al., 1997), där erosionen beräknas med följande ekvation:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A = Jordförlust (ton per hektar och år)

R = Regnintensitet (megajoule mm per hektar per timme per år)

K = Erosionskänslighet (ton timmar per megajoule per mm)

L = Sluttningslängd (enhetslös)

S = Lutning (enhetslös)

C = Markanvändning (enhetslös)

P = Erosionsskydd (enhetslös)

För beräkning av regnintensiteten R finns ett stort antal olika ekvationer att välja mellan, vilka baseras på olika mått på intensiva regn. Det går att hitta referenser med modellerade värden för regnintensiteten som täcker olika geografiska områden. För Sverige finns till exempel Panagos et al. (2015).

Erosionskänsligheten K styrs av markens egenskaper, exempelvis jordart. Det finns ett stort antal olika angreppssätt för att beräkna K-faktorn, dels ekvationer som ofta utgår från kornstorlek och ibland från organisk halt, dels tabeller på värden som har sin grund i jordart/textur.

(R)USLE är ursprungligen framtagen för en enhetsprovyta (unit plot) av definierad storlek och lutning. Det är orsaken till att faktorerna L och S, det vill säga sluttningslängden och lutningen, är enhetslösa. De beräknas relativt den standardiserade USLE-enhetsprovytans egenskaper och anges alltså inte i längd- respektive vinkelenheter. Ett antal olika metoder har tagits fram för att beräkna L och S utifrån det studerade områdets geometriska egenskaper, där GIS-verktyg ofta används.

Variabeln C varierar med markanvändningen (bar mark, jordbruksmark, skogsmark, se exempelvis Djodjic & Markensten, 2019). Värdet på C ligger i intervallet 0 till 1, där 1 representerar helt oskyddad och bar mark. Parametern påverkas starkt av vegetation och är alltså platsspecifik. Ett vegetationstäckeskydd bra mot erosion och ger låga C-värden.

Variabeln erosionsskydd, P, utgår ofta ur ekvationen och kan då sättas till 1, men kan till exempel användas för att beräkna effekter av åtgärder som vidtas för att förhindra erosion.

Vid beräkning av erosionens storlek med hjälp av RUSLE tas ingen hänsyn till den deposition som eventuellt sker på ytan, utan det som beräknas är förluster. Alltså inte hur mycket jord som tillförs från andra ytor. Modellen säger heller ingenting om vart den eroderade jorden tar vägen. Det som eroderar kommer inte nödvändigtvis att nå ett vattendrag och bidra till spridning i ytvatten. Den jord som eroderar bort kan i stället deponeras på en närlägen markyta. Det finns dock andra modeller som även tar hänsyn till deposition (Djodjic & Markensten, 2019).

3. Exempelberäkningar av erosion med RUSLE

Det förefaller som att RUSLE, eller liknande modeller, inte har tillämpats särskilt flitigt för förorenade områden, men det finns några exempel. Bland annat har De Munck et al. (2008) gjort en studie där RUSLE använts för att räkna på klimateffekters påverkan på erosion från gruvavfallshögar i Storbritannien.

För att få en grov skattning av erosionens betydelse för föroreningstransporten har en beräkning gjorts för ett hypotetiskt förorenat område. I möjligaste mån har platsegenskaper hämtats från de scenarier som används i Naturvårdsverkets verktyg för beräkning av riktvärden (Naturvårdsverket, 2009a).

3.1. Mängd jord som sprids genom erosion

För beräkning av spridningen genom erosion till ytvatten ansattes värden som följer.

Regnintensitet, R

Som värde på regnintensitet R användes $378 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$, vilket är ett medelvärde för Sverige (Panagos et al., 2015).

Erosionskänslighet, K

För erosionskänslighet ansattes $K = 0,02 \text{ ton h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, vilket är värdet för grus och för fyllning enligt Tabell B-1 nedan.

Sluttningslängd, L och lutning, S

Värden för L och S beräknades utifrån sluttningsens längd (λ) och lutning (θ) (Renard et al., 1997):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

där λ = sluttningsens längd i meter. Exponenten m beräknas med följande ekvation:

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

där β beräknas enligt följande:

$$\beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0,0896}}{0,56 + 3 \cdot (\sin \theta)^{0,8}}$$

För lutning mindre än 9 % gäller:

$$S = 10,8 \cdot \sin \theta + 0,03$$

I Naturvårdsverkets beräkningsverktyg för generella riktvärden används ett typområde som har måtten 50×50 meter (0,25 ha) och grundvattengradienten antas vara 3 %. Om

slutningslängden sätts lika med områdets längd (50 meter) och markens lutning antas vara densamma som grundvattengradienten ger detta $L = 1,3$ och $S = 0,35$.

Tabell B-1. K-värden ($\text{ton h mJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) enligt Djodjic & Markensten (2019).

Jordart	Markanvändning	K
Sand	Jordbruk	0,04
Lerig sand	Jordbruk	0,09
Sandig lerjord	Jordbruk	0,1
Sandig lerjord	Jordbruk	0,15
Lerjord	Jordbruk	0,5
Siltig lerjord	Jordbruk	0,82
Silt	Jordbruk	0,9
Sandig lera	Jordbruk	0,35
Lerjord	Jordbruk	0,67
Siltig lerjord	Jordbruk	0,95
Siltig lera	Jordbruk	0,82
Lera	Jordbruk	0,67
Organisk jordart	Övrigt	0,01
Lera	Övrigt	0,57
Grus	Övrigt	0,02
Sten-block	Övrigt	0,02
Isälvs sediment, sand-block	Övrigt	0,02
Moränlera	Övrigt	0,3
Morän	Övrigt	0,1
Tunt jordtäckte	Övrigt	0,1
Berg	Övrigt	0,01
Fyllning	Övrigt	0,02
Övrigt	Övrigt	0,02

Markanvändning, C

Beräkningen av erosion gjordes med följande värde på markanvändningen: $C = 1$ för bar mark.

Erosionsskydd, P

Som värde på erosionsskydd sattes $P=1$.

Beräknad erosion

Med dessa värden kan erosionen beräknas enligt följande:

$$A = 378 \cdot 0,02 \cdot 1,3 \cdot 0,35 \cdot 1 \cdot 1 = 3,4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$$

Detta kan jämföras med medelvärdet för erosion från jordbruksmark, som i Sverige har uppskattats till 1,1 ton ha⁻¹ år⁻¹. För landet som helhet uppskattas medelvärdet för erosionen till 0,4 ton ha⁻¹ år⁻¹ (Panagos et al., 2015). När den beräknade erosionen jämförs med dessa värden blir slutsatsen att det inte är orimligt att erosionen från ett förorenat område kan vara tio gånger så stor som medelerosionen i landet.

För det typområde som används för att beräkna generella riktvärden blir jordförlusten 0,25 ha · 3,4 ton ha⁻¹ år⁻¹ = 0,86 ton/år. Det kan tyckas mycket, men beräkningen har gjorts för bar mark som helt saknar ett skyddande vegetationstäck.

4. Riktvärden för spridning via erosion

De värden som använts ovan för att beräkna erosionen representerar samma typområde som används för att beräkna generella riktvärden. Det gör det möjligt att beräkna haltkriterier, som motsvarar generella riktvärden avseende skydd av ytvatten från spridning genom erosion.

Haltkriteriet för ytvatten i verktyget för beräkning av riktvärden multiplicerat med ytvattnets vattenflöde ger den maximala spridningen per år, som inte leder till en oacceptabel risk. Detta föroreningsflöde divideras sedan med den mängd jord som transporteras genom erosion från området per år, för att beräkna riktvärdet för mark.

Det ytvattenflöde som används för att beräkna generella riktvärden är 1 000 000 m³/år. Om detta värde används, tillsammans med den beräknade jordförlusten på 0,86 ton/år, kan ett riktvärde för skydd av ytvatten mot spridning genom erosion beräknas enligt följande:

$$RV_{RUSLE} = \frac{C_{crit,sw} \cdot Q_{sw}}{A'}$$

RV_{RUSLE} = riktvärde för skydd av ytvattenrecipient baserat på erosion (mg/kg)

A' = jordförlust (kg/år)

$C_{crit,sw}$ = ämnesspecifikt haltkriterium för skydd av ytvatten (mg/L)

Q_{sw} = flöde i vattendrag (L/år)

Jordförlusten A' i ovanstående uttryck är jordförlusten (A) beräknad enligt RUSLE multiplicerad med områdets yta i hektar. Faktorn 1 000 är en omvandlingsfaktor för att gå från ton till kilogram:

$$A' = 1000 \cdot A \cdot \text{områdets yta}$$

Beräknade riktvärden baserade på erosion redovisas i Tabell B-2. Riktvärden som beräknats med dessa antaganden är i några fall lägre än de generella riktvärdena (Tabell B-2).¹⁵ Riktvärdet för erosion för kvicksilver (2,3 mg/kg) ligger strax under MKM-riktvärdet (2,5 mg/kg). För PAH-H blir riktvärdet 6 mg/kg, vilket är lägre än MKM-värdet på 10 mg/kg och för PCB-7 blir riktvärdet 0,12 mg/kg, vilket också är lägre än

¹⁵ De generella riktvärdena är beräknade utifrån två olika typer av markanvändningsscenarier; känslig markanvändning (KM), såsom bostadsområden och lekplatser, och mindre känslig markanvändning (MKM), exempelvis industri- och kontorsområden.

MKM-värdet 0,2 mg/kg. För dioxin blir riktvärdet med utgångspunkt i erosion med dessa förutsättningar 0,1 µg/kg, vilket till och med är lägre än KM-värdet på 0,2 µg/kg.

De riktvärden för erosion som beräknats här ska ses som en första indikation på om erosion överhuvudtaget är relevant som spridningsväg och då främst i de fall det förorenade området består av en bar markyta utan vegetation. De indatavärden som används är en första ansats och metoder för beräkning behöver utvärderas och kvalitets-säkras innan de kan rekommenderas.

För att kunna beräkna ett riktvärde för mark, som gäller skydd av ytvatten avseende spridning genom erosion, användes haltkriterier för ytvatten i beräkningarna. Detta får anses som ett konservativt antagande eftersom den transport som sker genom erosion framför allt är partikelbunden, vilket innebär lägre toxicitet och att en stor del av partiklarna sannolikt kommer att sedimentera. En viss del (beroende på K_d) kommer att gå i lösning, alternativt transporteras i suspenderad form. Att föroreningarna sedimenterar betyder emellertid att det finns risk för höga halter i sedimenten. Beräkningsmetoden skulle kunna utvecklas för att även hantera sediment som ett skyddsobjekt, för att göra beräkningen mer heltäckande (se även avsnitt 3.4.5 i huvudtexten).

För ett mindre antal ämnen indikerar ändå beräkningarna att erosion kan vara en spridningsväg som har betydelse. Låga riktvärden för spridning genom erosion för dioxin kan vara en indikation på att erosion kan ha betydelse till exempel vid sågverk med dopping, som ofta är dioxinförorenade. Även för TBT kan noteras att riktvärdet för spridning genom erosion ligger nära det generella riktvärdet. TBT finns ofta på båtuppställningsplatser, som i regel ligger i anslutning till ytvatten och har grusade ytor, utan vegetation och därmed ett högt värde på markanvändningsfaktorn C.

Vid platsspecifika beräkningar kan situationen i vissa fall vara betydligt gynnsammare för erosion än vad beräkningsresultaten med generella antaganden indikerar. Det gäller särskilt markytans lutning, som kan ge upphov till betydligt högre vattenhastigheter och därmed kraftigare erosion, om marken lutar mer än antagna 3 %. Det är därmed uppenbart att erosion kan vara en viktig spridningsväg under sådana, inte ovanliga, förhållanden.

Notera att jordens fukthalt inte har beaktats i beräkningarna ovan. Om fukthalten beaktas blir beräknade riktvärden något högre (A och A' blir lägre i ekvationerna ovan om endast andelen torrsubstans beaktas). Med tanke på alla osäkerheter i beräkningarna är detta dock inte avgörande för slutsatserna.

Tabell B-2. Riktvärden baserade på erosion beräknat med RUSLE. I tabellen redovisas även generella riktvärden för känslig och mindre känslig markanvändning (Naturvårdsverket, 2022). Gulmarkeringarna avser ämnen där beräknade riktvärden för erosion är lägre än generella riktvärden för MKM.

Ämne	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Ämne	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)
	RUSLE	KM	MKM		RUSLE	KM	MKM
Antimon	116	12	30	Triklorfenoler	1 160	0,5	3
Arsenik	348	10	25	Tetraklorfenoler	232	0,5	3
Barium	11 604	200	300	Pentaklorfenol	232	0,5	3
Bly	580	50	180	Klorbensen	1 741	1	15
Kadmium	23	0,8	12	Diklorbensener	1 741	1	15
Kobolt	232	15	35	Triklorbensener	232	1	10
Koppar	1160	80	200	Tetraklorbensener	232	0,5	2
Krom tot	348	80	150	Pentaklorbensen	4,1	0,5	2
Krom (VI)	348	2	10	Hexaklorbensen	0,12	0,035	0,1
Kvicksilver	2,3	0,25	2,5	Diklormetan	11 604	0,08	0,25
Molybden	348	40	100	Dibromklormetan	1 451	0,5	2
Nickel	1 160	40	120	Bromdiklormetan	1 451	0,06	1
Vanadin	580	100	200	Triklormetan	1 451	0,4	1,2
Zink	4 642	250	500	Koltetraklorid	6 963	0,08	0,35
Cyanid total	580	30	120	1,2-diklorethan	5 802	0,02	0,06
Cyanid fri	580	0,4	1,5	1,2-dibrometan	5 802	0,0015	0,025
Summa fenol och kresoler	5802	1,5	5	1,1,1-triklorethan	5 802	5	30
Kresoler	5802	0,5	3	Trikloretan	5 802	0,2	0,6
Monoklorfenoler	3481	0,5	3	Tetrakloreten	5 802	0,4	1,2
Diklorfenoler	1 160	0,5	3	Dinitrotoluen (2,4)	1 160	0,05	0,5
	RUSLE	KM	MKM		RUSLE	KM	MKM

Ämne	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Ämne	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)	Riktvärde (mg/kg TS)
PCB-7	0,12	0,008	0,2	Aromat >C8-C10	5 802	10	50
Dioxin (TCDD-ekv)	0,000012	0,00002	0,0002	Aromat >C10-C16	1 393	3	15
PAH-L	1 160	3	15	Aromat >C16-C35	58	10	30
PAH-M	58	3,5	20	MTBE	58 022	0,2	0,6
PAH-H	5,8	1	10	DDT, DDD, DDE	14	0,1	1
Bensen	5 802	0,012	0,04	Aldrin-diieldrin	5,8	0,02	0,18
Toluen	5 802	10	40	Kvintozen-pentakloranilin	151	0,12	0,4
Etylbensen	5 802	10	50	Organiska tennföreningar	4,6	0,25	0,5
Xylen	5 802	10	50	Tributyltenn (TBT)	0,6	0,15	0,3
Alifat >C5-C8	3 481	25	150	Dibutyltenn (DBT)	81	1,5	5
Alifat >C8-C10	1741	25	120	Monobutyltenn (MBT)	928	0,25	0,8
Alifat >C10-C12	3 481	100	500	Irgarol	1,5	0,004	0,015
Alifat >C12-C16	34 813	100	500	Diuron	116	0,025	0,08
Alifat >C16-C35	34 813	100	1 000				

5. Klimatpåverkan i RUSLE

Bilagan har hitintills behandlat erosion under nuvarande klimatförhållanden. Vid bedömning av förhållandena i ett förändrat klimat är det främst regnintensiteten (R) i RUSLE som är klimatberoende. Andra variabler är inte direkt beroende av klimatet, även om det finns ett indirekt klimatberoende för faktorn markanvändning (C), där vegetationstäcke ingår. Detta eftersom klimatet kan påverka markanvändningen och därmed även vegetationstäcket. Det finns även en självförstärkande effekt genom att kraftig erosion i sig orsakar problem för vegetation att etablera sig på marken, vilket därmed skapar förutsättningar för ytterligare erosion.

Prognoser för förändringar i regnintensitet i Sverige har tagits fram i några studier (Hernebring et al., 2012; Hernebring, 2018; Olsson & Foster, 2013; Olsson et al., 2017). I dessa studier ligger fokus framför allt på extremhändelser med återkomsttider på flera år, med syftet att ta fram underlag för dimensionering av bland annat dagvattennät vid de allra högsta intensiteterna. Enligt Hernebring et al. (2012) förväntas 10–15 % högre regnintensitet för häftiga regn i slutet av seklet. Vissa scenarier gav dock en ökning på mer än 40 %. Olsson & Foster (2013) kommer till ungefär samma slutsatser; att en ökning i nederbörd för ett 10-årsregn i medeltal är 23 % vid seklets slut. En första gissning kan vara att erosionsförlusterna ökar ungefär lika mycket.



**STATENS
GEOTEKNISKA
INSTITUT**

Statens geotekniska Institut

581 93 Linköping

www.sgi.se

E post: sgi@sgi.se

Växel: 013-20 18 00