

# Olyckors miljöeffekter

**Lars Nyberg**

*Centrum för klimat och säkerhet*

*Karlstads universitet*

9 feb 2010

## **Uppdraget**

Som ett led i processen för Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) med att ta fram ett forskningsprogram lades ett flertal uppdrag ut under hösten 2009 om att skriva forskningsöversikter inom olika kunskapsområden. Syftet med översikterna är att översiktligt beskriva kunskapsläget inom respektive område och identifiera delområden där betydande kunskapsluckor finns. Denna översikt om Olyckors miljöeffekter bygger vidare på en översikt som gjordes 2005 på Räddningsverket.

## **Bakgrund**

Att olyckor och katastrofer kan ha en påtaglig påverkan på miljön är ett faktum och MSB har ett sektorsansvar för det svenska miljömålsarbetet. De typer av olyckor som har miljökonsekvenser är framför allt bränder, vid transporter av farligt gods, olyckor i industri- och energianläggningar och som konsekvens av naturolyckor, t ex vid översvämningar och ras/skred. Miljöeffekterna uppstår framför allt genom att kemiska ämnen som kan ha toxisk verkan på människor och ekosystem sprids. Förutom många mindre olyckor av dessa slag finns också litteratur om de större katastrofer som inträffat, t ex i Bhopal och Tjernobyli.

Även val av räddningsinsatsen kan ha betydelse för miljöeffekterna genom t ex släckmetod vid bränder. Säkerhetshöjande faktorer som användning av flamskyddsmedel i brännbara produkter har en miljöpåverkan genom en diffus spridning av medlet har blivit en miljö- och hälsobelastning. I takt med att miljöeffekterna från olyckor har uppmärksamats har det förebyggande arbetet ökat. Lagstiftning har anpassats för att ta hänsyn till miljön, policys och miljömål har formulerats och integrerat miljöskydd och riskhantering utvecklats.

Många av de miljöfrågor som är relevanta för MSB, i ett nationellt perspektiv, finns beskrivna av Alfredsson och Carlsson (2006). De delar in olyckstyperna i bränder, kemikalieolyckor, översvämningar/ras/skred/dammbrott, oljeutsläpp och olyckor med radioaktiva ämnen. Räddningsverket (2007) gjorde en enkätstudie till kommuner och en omfattande genomgång av insatsstatistik för att bedöma hur olyckssektorn påverkar miljön och miljömålen om giftfri miljö och grundvatten av god kvalitet. Delar av resultaten redovisas nedan.

## **Metod**

Denna översikt är en uppdatering av en motsvarande översikt som gjordes inom Räddningsverket 2005. Översikten utgörs av en sammanställning av litteratur som finns sökbar i databaser med vetenskapliga tidskrifter. Sökningar har bland annat gjorts i databaserna ISI och Compendex. De sökord som framför allt har använts är accident, disaster, environment, ecology, fire och toxic.

I den mån det har funnits svenska studier inom de olika olyckstyperna har dessa använts. Inom vissa områden är kunskapen generell och oberoende av plats. Bland annat för naturolyckor har internationella studier inkluderats eftersom MSB har ett internationellt uppdrag som ofta berör naturolyckor.

Nedan har redovisningen strukturerats utifrån de huvudtyper av olyckor som har allvarliga miljöeffekter: kemikalieolyckor, bränder och naturolyckor. Efter detta redovisas en rubrik om förebyggande arbete, inklusive olika metoder för miljöriskhantering. Avslutningsvis föreslås vissa delområden för fortsatt forskning.

## **Kemikalieolyckor**

Effekter på miljön vid kemikalieolyckor kan uppstå vid kommersiell hantering, lagring, transport (landsväg, järnväg, sjöfart, flygfrakt eller via pipeline), vid användning eller efter användning (slutförvaring, deponering). Föroreningar sprids till mark, luft och vatten, och i nästa steg potentiellt till människa och ekosystem. Spridning till människa kan t ex ske via direktkontakt, vid inandning, via dricksvatten eller livsmedel (Visentin, 2006).

Att kunna lära från inträffade olyckor för att nå ett bättre förebyggande arbete gäller även för kemikalieolyckor. Hou och Zhang (2009) redovisade en kinesisk databas som upprättats för att på ett systematiskt sätt hantera kunskap från tidigare kemikalieolyckor som fått allvarliga miljökonsekvenser. Under perioden 2002-2006 registrerades 82 allvarliga olyckor av vilka 61 hade ett snabbt och oväntat förlopp. Informationen för varje händelse kategoriserades utifrån: förhållanden före olyckan, beskrivning av händelseförlopp, konsekvenser (för människor, miljö, ekonomi och kostnader för räddningstjänst), åtgärder efter olyckan samt dokumentation. Den vanligaste orsaken till olyckor var oavsiktligt läckage (28%), och den näst vanligaste var trafikolyckor (16%). De föroreningar som släpptes ut var till 42% oorganiska ämnen (ex. klor), 28% organiska ämnen (ex. bensen) och 11% tungmetaller (ex. arsenik). Hälften av olyckorna ledde till allvarliga hälsoeffekter och dödsfall. Vanligtvis saknas detaljer om spridningsvägar, storlek på exponerad population och miljöeffekter.

I USA kräver lagstiftningen att spill av kemikalier och andra liknande utsläpp rapporteras till myndigheterna. Shorten *m fl* (2002) beskrev ett rapporteringssystem och en sammanställning av olyckor och incidenter i Chester county i Pennsylvania under perioden 1987-1999. Den mest vanliga olyckan var spill av bensin eller diesel, men även utsläpp av svavelsyra, klor och ammoniak hade rapporterats in.

Det finns en stor mängd publikationer om olika typer av spridningsmodeller avsedda för luft, mark och vattenmiljöer. I denna översikt kan inte dessa beskrivas, men det kan vara intressant att nämna några svenska studier. Fagerlund *m fl* (2008) utvecklade spridningsmodeller för 'non-aqueous phase liquids' (NAPL), t ex diesel i heterogen mark. Persson och Destouni (2009) undersökte hur föroreningsspridning kunde modelleras från källor på eller under markytan via grundvattnet till ytvatten.

## **Kärnolyckor**

Olyckan i Tjernoby 1986 då en kärnreaktor havererade och stora mängder radioaktivt material spreds till omgivningen har lett till ett stort antal studier under de drygt 20 år som gått. Spridningen av radioaktivt material efter olyckan beskrevs i en artikel av Pöllänen *m fl* (1997). Hälsoskadliga radioaktiva partiklar med en diameter >20 µm spreds över stora områden, från nedre Norrland i norr till Grekland i söder och till Schweiz i väster. Författarna menar att det var den partikulära formen på en väsentlig del av det utsläppta radioaktiva materialet som var en orsak till den långväga spridningen.

Mascanzoni (2009) har löpande studerat upptaget i svamp (sandsopp och kantarell) på en plats vid Heby i mellersta Sverige mellan 1986 och 2007. Upptaget av cesium-137 hade inte minskat, och för kantareller verkade upptaget ha ökat. Det sker ingen urlakning ur de översta marklagren utan en framtida minskning av halterna kommer att bero på radioaktivt sönderfall. Cesium-137 har en halveringstid på 30 år.

Bell och Shaw (2005) framhöll de ekologiska skadorna efter Tjernobylolyckan som allttjämt är ett stort problem, framför allt i Ukraina och Vitryssland. Författarna beskrev situationen i England, hur cesiumet från Tjernobyl deponerades och fastlades i jordbruksmarker pga adsorption till lerpartiklar i marken. I högre belägna betesmarker var radioaktiviteten mer mobil och togs upp i gräs och gick den vägen vidare till de betande fåren. En viktig slutsats är att det är viktigt att förstå de biogeokemiska flödesvägarna för att kunna förutsäga effekter av storskalig förorenings-spridning.

I samband med radioaktiva utsläpp vid en kärnanläggning i Savannah River i USA användes en räddningsinsatsmodell för att uppskatta strålexponering på allmänheten via inandning och från markdeponerat radioaktivt material (Simpkins, 2005). Modellen använde data i realtid för att följa spridningen från både momentana och kontinuerliga utsläpp. Till denna modell knöts en modell för intag via födan. De födoämnen som omfattades var mjölk, kött, vatten och fisk.

## **Kemikatastrofer**

Det som anses vara världens mest allvarliga föroreningskatastrof i modern tid är den i Bhopal i Indien 1984 (Sharma, 2002). Efter en explosion läckte tonvis med pesticider i gasform ut i de tätbefolkade omgivningarna till fabriken. Exakt vilken gas som läckte ut råder osäkerhet om men det anses huvudsakligen ha varit metylisocyanat. Ca 4000 människor omkom direkt och ca 200 000 skadades. Siffrorna är osäkra. Därefter har tusentals människor avlidit av sina skador. Sjukdomar som drabbat de berörda är t ex cancer, astma och missbildningar på nyfödda. Mycket har varit oklart efter olyckan och brister har funnits i den uppföljning som gjorts. I ett specialnummer av tidskriften *Journal of loss prevention in the process industries* (nr 18:4-6, 2005) publicerades 50 artiklar med anknytning till Bhopalolyckan. Gupta (2005) lyfte i en redaktörskommentar särskilt fram behovet av utbildning om säkerhet hos ingenjörer och kemister inom kemiindustrin. I en kommentar 25 år efter olyckan konstaterade Satyanand (2008) att ingen sanering av området gjorts men att Indiens regering tillsatt en kommission under 2008 för att stödja rehabiliteringen av de skadade och för att förse området med bra dricksvatten. Bhopal-olyckan har också lett till förändring i lagstiftning och regelverk i andra länder, t ex USA (Willey *m fl*, 2005) och Kanada (Lacoursiere, 2005)

Dioxinolyckan i Seveso i Italien 1976 har lett till ett flertal hälsoeffekter för den drabbade befolkningen. Visentin (2006) redovisade olyckans förlopp då 3000 kg dioxin samt ett antal andra kemikalier spreds i aerosolform över ett område upp till 6 km från fabriken.

Bertazzi *m fl* (2001) redovisade en 20-årig uppföljning av hälsoläget i Seveso. Dödligheten i olika cancerformer ökade, men även problem med hjärt/kärl- och hormonfunktioner var vanliga. Garagna *m fl* (2001) beskrev hur området där fabriken i Seveso låg gjordes om till ett parkområde där många djurarter etablerade sig. Djuren (t ex möss) undersöktes och användes som indikatorer på hur mycket dioxin som omsätts i ekosystemet. Olyckan var den direkta orsaken till att EU beslöt om det s k Sevesodirektivet som kräver ett säkerhetsarbete vid liknande industrier.

En omfattande brand inträffade 2005 i en bränsledepå i Buncefield, ca 40 km NV om London, England (Powell, 2006). 40 personer skadades och 2000 blev evakuerade. Stora materiella skador uppstod i den närliggande bebyggelsen. Sammanlagt brann ca 56 000 ton bensin, diesel och flygbränsle under fyra dagar. Olyckan orsakades av överfyllning i en av de 21 tankarna vilket ledde till spridning av ett gasmoln som antändes. Branden var den största i England sedan 1945 och kunde till sin karaktär jämföras med de brinnande oljekällor som förekom under Kuwaitkriget 1991. Föroreningarna bestod framför allt av metan, koloxid, kväveoxider och sotpartiklar. Drygt 8000 ton partiklar mindre än 10 µm (PM10) spreds och av dessa var ca 5000 ton mindre än 2,5 µm (PM2.5) (Vautard *m fl*, 2007). Mather *m fl* (2007) mätte spridningen av partiklar och gaser från branden, och kunde konstatera att spridningen till mark var begränsad pga en gynnsam meteorologisk situation med ett stabilt inversionsskikt i atmosfären på 3000 m höjd som fångade upp rökplymen. Både markbaserad, flygburen och satellitburen mätutrustning användes framgångsrikt för att mäta föroreningsspridningen. Vautard *m fl* (2007) använde luftspridningsmodellen ALOFT-FT för att studera hur en mindre gynnsam atmosfärisk situation skulle ha påverkat spridningsförloppet. Ett väderläge motsvarande en varm sommardag hade lett till en mer omfattande spridning till marknivån.

Vid den Bolidenägda gruvanläggningen Aznalcóllar i sydvästra Spanien brast en gruvdamm den 25 april 1998, varpå 5 milj m<sup>3</sup> tungmetallhaltigt slam (fr a zink, bly, koppar, arsenik) rann ut i floden Guadiamar. Olyckan fick omfattande miljökonsekvenser och ett flertal studier har publicerats därpå, t ex om metalltillgänglighet i jordar (Díaz-Barrientos *m fl*, 1999), bioackumulation av tungmetaller i vilda gräs (Madejón *m fl*, 2002), genetiska effekter på möss (Tanzarella *m fl*, 2001; Festa *m fl*, 2003)), blybelastning på stork (Meharg *m fl*, 2002) och effekter på flodmynningsområdet vid Atlanten (Gómez-Parra *m fl*, 2000).

Två liknande dammbrott inträffade i Maramures i Rumänien 2000 (Macklin *m fl*, 2003). Vatten och slam innehållande bl a cyanid, bly, zink, koppar och kadmium rann ut i floden Tizasas övre delar. Tisza är ett biflöde till Donau. Utflödet resulterade i omfattande fiskdöd och föroreningsspridning nedströms.

En typ av kemikaliekatastrofer är större oljeolyckor till havs och dess effekter vid kuster. Vid olyckan med fartyget Prestige utanför Spanien 2002 släpptes ca 60 000 ton tungolja ut som drev in mot Galiciens kust. Oljan innehöll tungmetaller, VOC (flyktiga organiska ämnen) och PAH (polyaromatiska kolväten). Skadorna på ekosystemen blev stora, bland annat för fågellivet. Fisket i provinsen fick upphöra under sex månader.

## **Bränder**

Miljöeffekter av bränder är i hög grad beroende på vilket eller vilka ämnen som brinner och vid vilken temperatur, syrgashalt och fukthalt förbränningen sker. Generellt kan man säga att emissionerna från en brand är svåra att förutsäga. Det finns också metodproblem vid studier av olyckor då de inträffar plötsligt och oväntat, och detta gör att det sällan fungerar att mäta, ta prover och analysera spridningen i anslutning till olyckan. Även behovet av jämförande studier, t ex före och efter en olycka är svåra eftersom det sällan finns material provtaget före en olycka. Jämförelsen får istället göras på material från en annan plats, eller med uppgifterna tagna från litteraturen. Men det finns också exempel på utdragna olyckor med en storskalig emissions-spridning, t ex från stora skogsbränder, där mätning och provtagning hinner planeras och genomföras.

Lönnermark *m fl* (2007) redovisade ett omfattande projekt – Emissioner från bränder – finansierat av Räddningsverket. Studien omfattade flera delar i kedjan från brandförlopp, bildning av föroreningar, spridning via luft och vatten och släckning. Bildäck och elektronikskrot användes i brandförsök. Projektet resulterade i ett flertal slutsatser, bland annat att tillgången på luft vid förbränningen påverkade emissionerna och att vattenbegjutning gav ett större utbyte av PAH och VOC. Spridning i mark är en mycket komplex företeelse där möjligheterna att prediktera är begränsade. Utsläpp till ytvatten späds ofta ut, medan utspädning i mark går betydligt långsammare.

Blomqvist *m fl* (2004) summerade ett projekt som drivits av Räddningsverket i samverkan med SGI och ett antal svenska kommuner. Syftet i projektet hade varit att provta emissioner från bränder, men även att utveckla metoder för sådan provtagning. Projektet var framgångsrikt när det gällde släckvattenprov, medan provtagning av luftburna emissioner inte fungerat lika väl. Slutsatsen var att PAH var ett stort problem i släckvatten, med större akut risk än dioxiner. Även VOC och metaller förekom i släckvattnet, i vissa fall i mycket höga halter. Bromerade flamskyddsmedel förekom framför allt vid bränder i elektronikskrot.

Hur lägenhetsbränders emissioner fäster på ytor undersöktes efter två bränder av Wobst *m fl* (1999). PAH, PCDD/F och PASH (polycyclic aromatic sulfur heterocycles) analyserades på prover som togs från dörrar, dörrkarmar, köksutrustning, tapeter, fönster och kläder. Höga halter av de tre föroreningstyperna förekom på flera ytor, men särskilt höga halter fanns på tapeter. Halterna på vissa ytor översteg de gränsvärden som fanns för att sanering skulle ske. Även om det fanns väsentliga halter av PCDD/F förekom PAH i relativt sett betydligt högre koncentrationer och identifierades därför som det största miljöproblemet.

Hertzberg och Blomqvist (2003) förbrände 24 olika typer av material eller produkter som vanligen förekommer i bostäder, för att studera bildningen av partiklar. Partikelbildningen var olika för de olika materialen. De produkter som innehöll flamskyddsmedel brann sämst och skapade mest partiklar. Från material som brann bra, t ex trämaterial,

bildades färre partiklar. Partiklar identifierades i intervallet 0,04-10 µm. Ett särskilt test gjorde av ett kompositmaterial gjort av kolfiberförstärkt vinylester. Detta material är mycket hållbart och används bl a för att tillverka flygplan, båtar etc. Vid underventilerad förbränning skapades en stor mängd fibrer som var att likna vid asbestfibrer, och som kan transporteras ner i lungorna vid inandning.

Hertzberg och Blomqvist (2003) gjorde också en allmän genomgång av partiklars förekomst och hälsofarlighet. Det är framför allt de finaste partiklarna (<1 µm) som är skadligast för hälsan genom att de når ända ner i lungorna utan att fastna i näsa eller svalg. Vissa forskare hävdar att det är partiklar <0,1 µm som utgör den största risken. Partiklar av denna storlek utgörs ofta av sot som uppstår vid underventilerad förbränning. Genom att andra skadliga ämnen, t ex metaller och dioxiner, binds till ytan på partiklar följer även dessa ämnen med ner i andningsvägarna. Det är inte ovanligt att det finns  $1 \times 10^{15}$  partiklar (<0,1 µm) per  $m^3$  i rök från en brand, och den sammanlagda ytan på dessa partiklar är större än 20-30  $m^2$  per  $m^3$  gas.

Vid brand i en plastmattelager 1987 i Holmsund, nära Umeå, brann 200 ton PVC-plast och 500 ton plastmattor upp fullständigt (Marklund *m fl*, 1989). En kraftigt stickande rök spreds över en del av samhället och ut över Bottenviken. Olyckan inträffade i januari varför snöprover kunde tas på olika avstånd upp till 1500 m från branden. En dioxinmängd på 3 mg (TCDDekv) beräknades ha spritts genom branden, vilket bedömdes vara en måttlig mängd i jämförelse med dåtidens dioxinutsläpp från avfallsförbränning.

Meharg *m fl* (1997) beskrev spridning till mark av dioxiner, furaner och tungmetaller från en engelsk PVC-brand. Det var 600 ton återvunnen PVC-haltig plast och 400 ton icke-klorhaltig plast som brann. Smält plast rann ut och täckte skogsmark, och i studien jämförs kontaminerad och ickekontaminerad mark. En effekt av spridningen av toxiska ämnen blev förhöjda halter och skador på levern hos skogsmus. Författarna diskuterar mekanismer för överföring av toxiska ämnen mellan plasten och marken/djurlivet.

Vid bränder i kemikalier (industrier, lager, etc) kan toxiska biprodukter skapas under branden. Med varierande lufttillgång och temperatur kan olika ämnen bildas ur samma ursprungsämnen. Lunghi *m fl* (2004) presenterade en småskalig metod för att testa vilka biprodukter som kan bildas när olika organiska föreningar brinner, och ger sist i artikeln ett antal tumregler för vilka biprodukter som kan bildas vid brand.

Meharg *m fl* (1998) studerade en brand i ett lager med 10 000 ton polypropylen 1995 i England och påträffade 16 olika PAH:er i gräs (upp till 70 ggr bakgrund) och jord (upp till 370 ggr bakgrund). Branden pågick i 9 tim. Depositionavståndet påverkades av PAH:ernas molekylvikt och hydrofobicitet. De PAH:er som var mest hydrofoba deponerades nära branden (<3 km) i partikelform medan mindre hydrofoba PAH:er deponerades i gasform längre från branden (>3.2 km). I vegetationen kunde påtagligt förhöjda halter påvisas upp till 4,5 km från branden. Författarna jämförde den långväga spridningen med andra studier som visar på en begränsad geografisk spridning, och pekade på att det spelar stor roll vilken vädersituation som råder vid olycksområdet.



En brand 1995 i en transformator i ett kraftverk i Israel gav spridning av PCB (Dayan och Koch, 2002). Spridning modellerades med en gaussisk plymmodell, och kalibrering av plymen gjordes med hjälp av foton från olyckan. Därefter provtogs löv (akacia; på avstånden 120, 250, 400 och 750 m) för att PCB-spridningen skulle kunna skattas, och en kontinuerlig minskning med avståndet från branden påvisades. En metod utvecklades för att utifrån uppmätta halter i vegetationen skatta halterna i atmosfären under spridningsförloppet samt skatta totala mängden PCB som spreds. Av 800 kg PCB som fanns i transformatorn spreds 4-9 kg. Större partiklar (>500 µm) som deponerades pga gravitationen inom kraftverksområdet omfattades inte av modelleringen.

## Skogsbrand och brand i organiskt material

Skogsbrand är en naturlig process som skogsekosystemen är beroende av. Samtidigt ger skogsbränderna ekonomiska skador för skogsbruket och dessutom ger de emissioner till atmosfären av partiklar och kemiska ämnen som t ex PAH och VOC. Förutom skogsbränder sker även bränder på gräs- och buskmarker, och avsiktlig bränning av skörderester sker inom jordbruket. Rök från skogsbränder kan transporteras hundratals och tusentals kilometer. Med hjälp av fjärranalys kan uppskattningar av rökplymnas egenskaper göras.

I samband med omfattande skogsbränder i Quebec i Canada transporterades röken söderut i ett stråk mot USA, och i staden Baltimore i Maryland ca 1500 km från brandområdena försämrades luftkvaliteten påtagligt (Sapkota *m fl*, 2005). Mätningar både utomhus och inomhus visade drastiskt förhöjda halter av finpartiklar, framför allt partiklar med en diameter <2.5 µm (PM2.5). Antalet partiklar i diameterintervallet 0.8-0.9 µm ökade 30 gånger. Kvoten mellan antalet partiklar inomhus respektive utomhus var i medeltal 0,91 vilket innebar att partiklarna trängde in i bostäder i stor omfattning. Ett markbaserat LIDAR-instrument mätte aerosolhalten över tiden, och satellitsensorn MODIS användes för att följa plymens passage. Ursprunget för röken i Baltimore spårades tillbaka till Quebec med hjälp av en "backtrajectory model".

Lee *m fl* (2005) beskrev en episod från maj 2003 då rök från fler än 11 000 sibiriska skogsbränder drog in över Korea och gav väsentlig påverkan på luftkvaliteten. Mätningar av finpartiklar (PM10) gjorda i Syd-Korea visade på en fördubbling jämfört med bakgrundshalten, vilket gjorde att de uppsatta gränsvärdena för partiklar överskreds kraftigt. Information från MODIS användes för att beräkna ett mått på halten aerosoler - *aerosol optical depth*.

Det råder en osäkerhet om huruvida dioxiner bildas vid skogsbränder. I en studie i Korea provtogs jord och aska på tre platser där skogsbrand förekommit och på två platser där det inte brunnit (Kim *m fl*, 2003). Materialet analyserades med avseende på PAH, dioxiner (PCDD) och furaner (PCDF) en, fem respektive nio månader efter branden. Resultaten visade att dioxin- och furanhalterna i jorden en månad efter branden var 3-5 ggr högre där det brunnit jämfört med kontrollplatserna (3-5 respektive ca 1 pg I-TEQ/g). Kontrollplatserna hade bakgrundshalter som var jämförbara med andra undersökta

oförorenade platser belägna på landsbygden. För PAH var skillnaden mer än 10 ggr. Efter fem och nio månader hade dioxin- och furanhalterna sjunkit ner till i nivå med kontrollen, medan för PAH hade halterna i jorden gått ner men var alltså 3-5 ggr högre än kontrollen. Orsaken till nedgången i PAH tolkades som att PAH varit bundet till aska, som delvis hade försvunnit pga vind- och regnerosion. Eftersom halveringstiden för dioxiner i mark från andra undersökningar skattades till ca 10 år dras slutsatsen i denna studie att nedgången även för dessa ämnen var kopplad till askan och dess förlust ur systemet.

Blomqvist *m fl* (2002) gjorde en grov beräkning av utsläppen från skogsbränder i Sverige under 1999. Mängden brunnna skog skattades från brunnna areal i kombination med ett känt värde på det förlorade virket. Emissionsfaktorer saknades för skogsbrand och istället användes faktorer för trä. Man kom fram till att skogsbränder stod för ca 1% av dioxinutsläppen, 15-20% av PAH-utsläppen och 20-25% av VOC-utsläppen. Motsvarande beräkningar gjordes även för bränder i bostäder, allmänna byggnader, industrier, andra byggnader, papperskorg/soptunna/container och motorfordon/tåg.

I två finska studier (Niemi *m fl*, 2004; Sillanpää *m fl*, 2005) beskrevs hur förhöjda halter i Finland av bland annat partiklar under episoder kunde härledas till förbränning av odlingsrester inom jordbruket i Baltikum och Ryssland på mer än 1000 km avstånd.

Emissioner från brand i fyra typer av flisat träavfall studerades i en australiensisk undersökning (Bhargava *m fl*, 2002). Analyser gjordes av emitterat PAH, PCB och PCDD/F, och man fann mindre emissioner från okontaminerat material jämfört med trä som innehöll naturliga oljor eller var kontaminerat med klor från en industriprocess.

## **Brand i avfall**

Blom och Geo (2004) gjorde en särskild litteratursammanställning om brand i avfall för Räddningsverket där ett tjugotal publikationer inkluderades. De typer av avfallsbränder som förekom var bland annat fullskaliga deponibränder, bränder i containrar, avfallsbalar och tunnor. Flera studier var gjorda i USA men även ett antal svenska och finska studier fanns redovisade. Emissionerna från avfallsbränder är, liksom emissioner från andra typer av bränder, i stor grad beroende av vad för ämnen som ingår i avfallet och vid vilken temperatur, syrgashalt och fukthalt förbränningen sker.

Inplastade avfallsbalar eldades i en svensk studie (Nammari *m fl*, 2004). Höga halter av sot, PAH, dioxiner och furaner och vissa tungmetaller som bly och kadmium uppmättes i brandröken.

I den skattning som Blomqvist *m fl* (2002) gjorde av utsläpp från bränder i Sverige under 1999 stod brand i containrar för ca 40% av dioxinutsläppen. Bidraget till totala PAH- och VOC-utsläppen var litet. Man bör dock notera att dessa beräkningar var behäftade med osäkerheter och gällde för ett enstaka år.

För mer kunskap om avfallsbränder hänvisas till Blom och Geo (2004).

## **Släckning och flamskydd**

Larsson och Lönnermark (2002) avhandlade frågor om släckvatten och dess bidrag till föroreningsspredning. De konstaterar att belastning av förorenat släckvatten kan ge en större miljöeffekt pga större lokal koncentration, jämfört med en mer utspridd transport via atmosfären. Användning av skumvätskor för brandsläckning kan ge en extra miljöbelastning.

En allvarlig olycka då släckvatten spelade en avgörande roll var branden 1986 i Sandos anläggning för produktion av pesticider i Basel. 15 000 m<sup>3</sup> släckvatten rann ut i Rhen och transporterade ut 40 ton kemikalier. En viss del av kemikalierna var kvicksilverhaltiga svampmedel. Utläppet ledde bland annat till en omfattande fiskdöd.

Bromerade flamskyddsmedel har använts i stor omfattning för att ge olika typer av produkter ett bra brandskydd. De bromerade medlen har dock visat sig ha oönskade effekter på hälsa och miljö. I ett särskilt nummer av tidskriften *Environment international* (nr 29:6, 2003) gjordes en grundlig redovisning av forskningen om flamskyddsmedlens hälso- och ekosystemeffekter.

Nya flamskyddsprodukter utvecklas som ersättning till bromerade dito. Porter *m fl* (2000) redovisade en översikt över nanokompositer, som är uppbyggda av kiselföreningar från t ex lermineral och organiska polymerer som t ex polystyren. Miljöfördelarna är stora jämfört med bromerade ämnen. Pereyra och Guidice (2009) testade flamskyddet från natrium- och kaliumsilikater på träpaneler med gott resultat. Hermansson *m fl* (2003) testade materialet Casico som är ett polyolefinmaterial med en flamskyddande tillsats av kisel, kalk och en organisk polymer. Denna typ av material kan ersätta PVC i elektriska kablar men brandkänsligheten hos polyolefin kräver ett bra brandskydd. När Casico förbränns bildas ett förkolnat lager på ytan som skyddar underliggande material från höga yttemperaturer.

## **Naturolyckor**

Naturolyckor är kopplade till miljötillståndet på olika vis. Dels kan miljö- och naturförhållanden påverka hur naturolyckan uppstår och utvecklas, dels kan naturolyckan leda till negativa konsekvenser för naturmiljön. Dessutom kan naturolyckor ge vissa positiva effekter för naturmiljön, t ex vid översvämningar av strandnära marker. Srinivas och Nakagawa (2008) gjorde en sammanställning av de negativa effekter som kan uppstå efter olika typer av naturolyckor och även av de miljöfaktorer som kan påverka själva naturolyckan (Tabell 1).

I den omfattande katastrof som följde av tsunamin i Indiska oceanen 2004 uppstod också en omfattande påverkan på miljön, vilket redovisas av Srinivas och Nakagawa (2008).

Det som påverkade miljön mest var spridning och hantering av det avfall som bildades när hus, bilar, anläggningar, etc, spolades bort och blandades med kemiska ämnen av olika slag. Det var stora problem med att kunna deponera alla dessa massor och att sortera och återanvända material. Spridning skedde av toxiska ämnen, såsom asbest, olja och andra ämnen. Ofta eldades massor och bråte upp vilket gav spridning av föroreningar. Mark och vatten förorenades på olika sätt. En variant av detta var försaltning pga de stora mängder havsvatten som spolades in över land. Toaletter och septiktankar skadades vilket ledde till spridning av avloppsvatten. Anläggningar såsom vattenverk, reningsverk och avfallsstationer skadades. Författarna betonade vikten av metoder för att snabbt minska miljöskadorna vid liknande händelser. På de platser där mangroveskog, korallrev, sanddyner och våtmarker var intakta blev skadorna av tsunamin väsentligt mindre. Denna typ av naturligt skydd benämns ”first line of defence”. Många av rekommendationerna inför liknande händelser handlar om att bevara eller återställa naturliga skyddande strukturer.

Även Sudmeier-Rieux *m fl* (2006) betonade vikten av att integrera förvaltningen av ekosystem med hanteringen av naturrisker. Det de kallar ”The ecosystem approach” innebär också att möjligheten till försörjning för människor ökar efter en katastrof, beorende på att marker, vattensystem, etc skadas i mindre omfattning.

I samband med stormen Katrina och de översvämningar som drabbade Louisiana, Mississippi och staden New Orleans i augusti 2005 skedde en omfattande spridning av kemiska ämnen (Reible, 2009). Totalt översvämmades ca 2300 platser där kemiska ämnen förvarades såsom industrier, bensinstationer, tankar, förvaringar av miljöfarligt avfall och även förorenade markområden (Crocker, 2005). Ämnen som spreds var bland annat petroleumprodukter, pesticider, kemikalier till kemtvättar och tungmetaller.

Orkanen Gudrun som drabbade södra Sverige i januari 2005 orsakade en omfattande påverkan på natur och miljö (Hellsten *m fl*, 2006). De anläggningar som etablerades för att lagra virke gav en tydlig påverkan på vattenmiljön. Sammantaget etablerades en sjöterminal och 149 landterminaler för timmer och 15 för massaved. Landterminalerna var belägna på jordbruksmark, skogsmark och i grustäkter. Timmer (avsett för sågverk) behöver kontinuerlig bevattning vilket ger ett läckage av bland annat fosfor och organiskt material. Vid större terminaler med mindre recipienter var påverkan tydlig. Terminalen med sjölagring gav en betydande påverkan på sjövattnet. Syrehalterna sjönk kraftigt och fosforhalterna ökade.

Uppföljningar har även gjorts av hur orkanen Gudrun påverkade den biologiska mångfalden (Andersson *m fl*, 2006). En positiv faktor som uppstod var att förekomsten av död ved ökade vilket gynnar vissa arter. Vid en återinventering av nyckelbiotoper visade det sig att dessa inte drabbades lika hårt som produktionsskog. Ogynnsamma förhållanden vid drivningen av virket gav körskadador. En rekommendation för framtiden var att låta skyddade områden vara vid efterarbetet med stormfällad skog, och att alltid lämna lövträd och redan torra stammar som inte utgör något problem vad gäller skadeinsekter.

Översvämningar kan leda till spridning av kemikalier och andra föroreningar. I en studie för Klimat- och sårbarhetsutredningen visade Andersson-Sköld *m fl* (2007a) att spridningen av näringsämnen, smittämnen, humusämnen och salter ökar vid översvämningar. Föroreningskällor är framför allt avloppssystem, åkrar och andra marker och urbana ytor. Spridningen sker bland annat via partiklar, vars förekomst ökar till följd av markerosion. Pga de stora vattenflöden som förekommer vid översvämningssituationer sker en utspädning av föroreningshalterna vilket motverkar problemen. I en parallell studie fann Andersson-Sköld *m fl* (2007b) att risken för spridning från förorenade marker är liten vid enstaka översvämningar. I en delstudie för Göta älv framkom dock att en ökad avrinning generellt leder till en ökad föroreningstransport i vattendraget.

Okay *m fl* (2001) beskrev hur en jordbävning (Richter 7.4) drabbade Izmit Bay i Turkiet 1999. Jordbävningen skadade flera kuststäder och gjorde att förorenade bottensediment i bukten resuspenderades. Ett oljeraffinaderi började brinna och spred stora mängder PAH över bukten, som redan var förorenad av industri. Ett miljöövervakningsprogram hade startats strax före olyckan vilket gjorde att man bättre kunde analysera olyckans konsekvenser. PAH-halterna steg i havsvatten, i sediment och i musslor, med högst koncentrationer närmast raffinaderiet. Biomarkörer användes för att studera effekterna på musslor.

Tabell 1. Potentiella miljöskador och miljöfaktorer som kan förvärra naturolyckor för olika naturolyckstyper (Srinivas och Nakagawa, 2008).

Type of Disaster	
Earthquake	<p>Potential environmental impacts</p> <p>Natural gas leaks, household and industrial chemical releases from damaged containers. Damage to industrial facilities resulting in toxic release. Building waste debris, and potential mix of hazardous materials</p> <p>Exacerbating environmental factors</p> <p>Topography and land cover Building codes and urban planning/urbanization processes</p>
Flood, storms, hurricanes, typhoons, cyclones	<p>Potential environmental impacts</p> <p>Sewage overflow and chemical releases from roads, farms and factories; Hazardous debris – chemicals, medical and other materials as disaster debris; water-damaged household chemicals (paint, pesticides, solvents); unsafe water supplies Ground and surface water contamination Loss of topsoil due to rapid drain of runoff.</p> <p>Exacerbating environmental factors</p> <p>Habitat and ecosystem destruction (e.g. coral reefs and mangroves) Deforestation and water siltation Urbanization and land use/land cover changes</p>
Forest fires	<p>Potential environmental impacts</p> <p>Loss of biodiversity and ecologically sensitive habitats Air pollution from smoke and haze</p> <p>Exacerbating environmental factors</p> <p>Climate change Deforestation and land use/land cover changes</p>
Droughts	<p>Potential environmental impacts</p> <p>Habitat and crop destruction</p> <p>Exacerbating environmental factors</p> <p>Urbanization and unsustainable resource consumption Deforestation and land use/land cover changes</p>
Landslides	<p>Potential environmental impacts</p> <p>Damage to habitat and land use functions, including agriculture Ground and surface water contamination</p> <p>Exacerbating environmental factors</p> <p>Deforestation and land-use/land cover changes</p>

## **Förebyggande av miljöolyckor**

Olika typer av metoder håller på att växa fram där riskhantering blir integrerad med olika typer av miljöbedömningar. Metodiken för 'ecological risk assessments' (ERA) har till stor del utvecklats i USA sedan 1981 (Suter *m fl*, 2003), då EPA gav ut en sk "red book". Inledningsvis var ERA inriktat på kvantitativ sannolikhetsanalys men senare utvecklades bl a sambandet mellan människors hälsa och ekologiska riskbedömningar. Cormier och Suter (2008) föreslog en miljöbedömningsmetodik där beskrivningar av försämrade miljövillkor och analys av orsaker till miljötillståndet integreras med bedömningar av ekologiska, sociala och ekonomiska risker och vinster med olika handlingsalternativ.

Suter *m fl* (2005) beskrev WHO:s 'International program for chemical safety', som integrerar risker för människors hälsa med risker för ickemänskliga organismer och ekosystem. Därigenom tydliggörs beroendet mellan människan, ekosystemen och miljön, och man kan få en samlad toxikologisk bedömning för alla arter.

Hamzi *m fl* (2009) föreslog att en befintlig metodik för miljöpåverkan inom processindustri – Environmental Effect Analysis (EEA) – skulle kompletteras med en riskhanteringsdel så att även oförutsedda händelser och inte bara normal drift kunde inkluderas.

Åsa Scott på FOI har publicerat flera artiklar om hur användningen av ett miljöolycksindex kan förbättra möjligheterna att bedöma olycksrisker vid hantering av kemikalier. Indexet bygger på information om hur stora kemikaliemängder som transporteras eller lagras, hur akuttoxiska kemikalierna är för akvatiska organismer, viken konsistens/viskositet och vattenlöslighet ämnet har samt hur mark- och vattenförhållandena är på platsen där riskerna skattas (Scott, 1998). I Scott *m fl* (2002) användes data från 42 svenska olyckor för att validera indexet. I ytterligare en artikel redovisas resultaten från ett försök där en expertpanel använts för att bedöma miljökonsekvenser vid kemikaliespill, i syfte att utveckla miljöolycksindexet (Scott Andersson *m fl*, 2005). Andersson *m fl* (2007) använde en multivariat statistisk analys för att studera samband mellan kemiska och plats specifika faktorer i 18 kemiolyckor med konsekvenser uttryckta av en expertpanel.

Med hjälp av en modell för livscykelanalys (LCA) jämförde Simonsson *m fl* (2003) hur miljöprestanda skiljer vid förbränning av två olika typer av kablar. De två kablarna hade höljen av PVC respektive Casico (se ovan). I LCA:n tas hänsyn till produkternas livslängd, förbränningsscenarier etc. Olsen *m fl* (2001) gjorde en metodologisk jämförelse mellan LCA och riskanalys, och konstaterar att debåda metoderna har olika utgångspunkter men att de kan komplettera varandra på ett bra sätt.

På översvänningsområdet har Meyer *m fl* (2008) använt multikriterieanalys (MCA) för att kvantifiera olika ekonomiska, sociala och ekologiska sårbarheter, som ett led i en riskanalys. De framhöll att MCA är en lämplig metod om man inte kan eller vill fullt ut sätta ett monetärt värde på potentiella skador. De har också utvecklat metodik för att kombinera MCA och GIS, vilket ger en rumslig MCA. Metodutvecklingen kopplas till kraven i EU:s översvänningsdirektiv, artikel 6, som kräver en riskkartering av ekonomiska, ekologiska och sociala värden.

Konceptet Säkerhet-Hälsa-Miljö, på engelska Safety-Health-Environment (SHE), är ett försök att integrera dessa områden i ett lednings- och kontrollsystem. Konceptet utvecklades inom off-shore industrin, men Crawley (2004) pekade på möjligheter att överföra systemet till kemisk industri on-shore. Willis *m fl* (2004) beskrev en metod för att inkorporera miljöaspekter i en riskrankning som sedan tidigare inkluderade säkerhets- och hälsoaspekter. Rankningen utfördes av lekmän.

## **Forskningsbehov**

Miljöpåverkan från olyckor kan indelas i olika steg. Det finns en föroreningskälla som ger emissioner, det finns spridningsmekanismer som leder till en exponering för människor och ekosystem. Organismer tar upp ämnen som kan vara skadliga. När detta blir känt reagerar samhället (i bästa fall) med ett förebyggande arbete för att hindra dessa olyckor. I alla dessa steg finns komplicerade processer och samband som behöver beforskas för att ett gott förebyggande arbete ska kunna utföras.

Av de många faktorer som styr olyckors miljöeffekter finns t ex vilka ämnen eller material som ingår i olyckan eller i vilken fysisk, kemisk och biologisk miljö olyckan inträffar. Detta gör att det är svårt att få en samlad bild över hur stor miljöbelastningen är från olyckssektorn. Det är ett långsamt och tålmodigt arbete att bygga upp kunskap om olika olyckstyper. Men i denna översikt framgår det tydligt att mycket viktigt arbete har gjorts, och värt att uppmärksamma är att det i flera fall är svenska forskare som bidragit. Ibland har det varit på uppdrag av Räddningsverket/MSB, ibland har det genomförts i andra sammanhang.

Det finns behov av fortsatt forskning för att kartlägga hur stora utsläppen är från olika olyckstyper. Det finns fortfarande många frågor som är obesvarade. Jämförelser mellan olyckssektorns miljöbelastning och den kontinuerliga belastning som finns från andra sektorer är viktiga. Olyckssektorns bidrag till de nationella PAH utsläppen förefaller vara betydande. Metodik för att kunna mäta emissioner till luft, mark och vatten behöver fortsätta att utvecklas. Problematiken med olyckornas plötsliga och oväntade förekomst ställer särskilda krav på provtagningsmetodik. Och i anslutning till räddningsinsatsen behövs enkla och robusta metoder för att bedöma miljörisker.

Inträffade olyckor måste användas som kunskapskällor för ett kommande förebyggande arbete. Att systematiskt samla in data och observationer från händelseförlopp, konsekvenser och vidtagna åtgärder är basen för ett lärande. För detta krävs också en databashantering som gör all information brett tillgänglig.

Hur miljöeffekter kan integreras i riskanalyser har beforskats i fr a USA sedan 80-talet. Vi har därför behov av fler liknande studier i ett svenskt sammanhang. Särskilt viktigt är att få fram bättre metoder för att bedöma miljöns känslighet.

Naturolyckorna har en dubbel relation till miljön, där bevarade naturliga strukturer och en god markanvändning kan mildra effekter av olika naturkrafter, men där också ekosystem och mänskliga miljöer kan ta skada av föroreningar vid översvämningar, skred, etc. Vissa naturolyckstyper, t ex översvämningar och skogsbrand, har också positiva effekter för ekosystemen. Dessa olika relationer behöver belysas genom forskning och sättas i ett perspektiv av hållbar utveckling. Särskilt viktigt är detta för utvecklingsländer.

I projektet Emissioner från bränder (Lönnermark *m fl*, 2007) identifierades forskningsbehov inom brandsektorn. De belyste bland annat behovet av att studera emissioner från andra material än bildäck och elektronikskrot. De emissionsmodeller som



byggts upp i projektet behöver utvecklas vidare och valideras i fler tester. De resultat från spridningsberäkningar som gjorts behöver jämföras med storskaliga experiment eller verkliga bränder. Ytterligare studier av spridning i mark behövs eftersom denna typ av spridning ofta sker på ett komplext vis i heterogen mark. Behov finns också av ytterligare studier av hur släckmedel och släcktaktik påverkar bildning och spridning av emissioner.

## Referenser

Alfredsson C och Carlsson C-H. 2006. *Räddningstjänst och miljö*. Räddningsverket, U30-652/06.

Andersson M, Appelqvist T, Edman T, Liedholm H, Niklasson M, Norden B och Paulsson J. 2006. *Miljökonsekvenser för biologisk mångfald – Underlagsrapport inom projekt Stormanalys*. Skogsstyrelsen, rapport 2006:11.

Andersson-Sköld Y, Nyberg H och Nilsson G. 2007a. *Förorenings-spridning vid översvämningar – Etapp 1*. Statens geotekniska institut, rapport Varia 576.

Andersson-Sköld Y, Nyberg H, Göransson G, Lindström Å, Nordbäck J och Gustafsson M. 2007b. *Förorenings-spridning vid översvämningar – Etapp 2*. Statens geotekniska institut, rapport Varia 577.

Bell JNB och Shaw G. 2005. Ecological lessons from the Chernobyl accident. *Environment international*, 31:771-777.

Bertazzi PA, Consonni D, Bachetti S, Rubagotti M, Baccarelli A, Zocchetti C och Pesatori AC. 2001. Health effects of dioxin exposure: A 20-year mortality study. *American journal of epidemiology*, 153(11):1031-1044.

Bhargava A, Dlugogorski BZ och Kennedy EM. 2002. Emission of polyaromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and furan from fires of wood chips. *Fire safety journal*, 37:659-672.

Blom S och Geo A. 2004. *Emissioner av toxiska ämnen i samband med brand i avfall – En litteratursammanställning*. Rapport P21-455/04, Räddningsverket.

Blomqvist P, Lönnermark A och Simonson M. 2004. *Miljöbelastning vid bränder och andra olyckor. Utvärdering av provtagning och analyser*. Rapport P21-452/04, Räddningsverket.

Blomqvist P, Persson B och Simonsson M. 2002. *Utsläpp från bränder till miljön – Utsläpp av dioxin, PAH och VOC till luften*. Rapport P21-407/02, Räddningsverket.

Cormier SM och Suter GW. 2008. A Framework for Fully Integrating Environmental Assessment. *Environmental Management*, 42:543–556.

Crawley FK. 2004. Optimizing the life cycle safety, health and environment impact of new projects. *Process safety and environmental protection*, 82:438-445.

Crocker DP. 2005. Environmental impacts of hurricanes Katrina & Rita. *Water and wastes digest*, 45:12.

Dayan U och Koch J. 2002. Dispersion of PCB in the environment following an atmospheric release caused by a fire. *The science of the total environment*, 285:147-153.

Díaz-Barrientos E, Madrid L och Cardo I. 1999. Effects of flood with mine wastes on metal extractability of some soils of the Guadiamar river basin (SW Spain). *The science of the total environment*, 242:149-165.

Fagerlund F, Niemi A och Illangaskere TH. 2008. Modeling of nanaqueous phase liquid (NAPL) migration in heterogeneous saturated media: Effects of hysteresis and fluid immobility in constitutive relations. *Water resources research*, 44:W03409.

Festa F, Cristaldi M, Ieradi LA, Moreno S och Cozzi R. 2003. The Comet assay for the detection of DNA damage in *Mus spretus* from Dõnana national park. *Environmental research*, 91:54-61.

Garagna S, Zuccotti M, Vecchi ML, Rubini PG, Capanna E och Redi CA. Human-dominated ecosystems and restoration ecology: Seveso today. *Chemosphere*, 43:577-585.

Gómez-Parra A, Forja JM, Delvalls TA, Sáenz I och Riba I. 2000. Early contamination by heavy metals of the Guadalquivir estuary after the Aznalcóllar mining spill (SW Spain). *Marine pollution bulletin*, 40(12):1115-1123.

Gupta JP. 2005. Bhopal gas tragedy and its effects on process safety. *Journal of loss prevention in the process industry*, 18:195-196.

Hamzi R, Innal F, Bourmada N och Londiche H. 2009. En environmetal analysis of the impact of an accidental fire in process industries. *International journal of chemical reactor engineering*, 7:A88.

Hellsten S, Westling O och Larsson P-E. 2006. *Miljökonsekvenser för vattenkvalitet – Underlagsrapport inom projekt Stormanalys*. Skogsstyrelsen, rapport 2006:10.

Hermansson A, Hjertberg T och Sultan B-Å. 2003. The flame retardant mechanism of polyolefins modified with chalk and silicone elastomer. *Fire and materials*, 27:51-70.

Hertzberg T och Blomqvist P. 2003. Particles from fires – a screening of common materials found in buildnings. *Fire and materials*, 27:295-314.

Hou Y och Zhang T-Z. 2009. Evaluation of major polluting accidents in China – Results and perspectives. *Journal of hazardous materials*, 168:670-673.

Kim E-J, Oh J-E och Chang Y-S. 2003. Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil. *The science of the total environment*, 311:177-189.

Lacoursiere PE J-P. 2005. Bhopal and its effects on the Canadian regulatory framework. *Journal of loss prevention in the process industry*, 18:353-359.

Larsson I och Lönnermark A. 2002. *Utsläpp från bränder – Analyser av brandgaser och släckvatten*. SP rapport 2002:24, Sveriges provnings- och forskningsinstitut.

Lee KH, Kim JE, Kim YJ, Kim J och von Hoyningen-Huene W. 2005. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003. *Atmospheric pollution*, 39:85- 99.

Lunghi A, Gigante L, Cardillo P, Stefanoni V, Pulga G och Rota R. 2004. Hazard assessment of substances produced from the accidental heating of chemical compounds. *Journal of hazardous materials*, A116:11-21.

Lönnermark A, Andersson-Sköld Y, Axelsson J, Haeger-Eugensson M, Palm Cousins A, Rosén B och Stripple H. 2007. *Emissioner från bränder - Metoder, modeller och mätningar*. Räddningsverket, P20-470/07.

Macklin MG, Brewer PA, Balteanu D, Coulthard TJ, Driga B, Howard AJ och Zaharia S. 2003. The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures county, upper Tisa basin, Romania. *Applied geochemistry*, 18:241-257.

Madejón P, Murillo JM, Marañón T, Cabrera F och López R. 2002. Bioaccumulation of As, Cd, Cu, Fe and Pb in wild grasses affected by the Aznalcóllar mine spill (SW Spain). *The science of the total environment*, 290:105-120.

Marklund S, Andersson R, Tysklind M och Rappe C. 1989. Emissions of PCDDs and PCDFs from a PVC-fire in Holmsund, Sweden. *Chemosphere*, 18(1-6):1031-1038.

Mascanzoni D. 2009. Long-term transfer of <sup>137</sup>Cs from soil to mushrooms in a semi-natural environment. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 282:427-431.

Mather TA, Harrison RG, Tsanev VI, Pyle DM, Karumudi ML, Bennett AJ, Sawyer GM och Highwood EJ. 2007. Observations of the plume generated by the December 2005 oil depo explosions and prolonged fire at Buncefield (Hertfordshire, UK) and associated atmospheric changes. *Proceedings of the royal society A*, 463:1153-1177.

Meharg AA, Pain DJ, Ellam RM, Baos R, Olive V, Joyson A, Powell N, Green AJ och Hiraldo F. 2002. Isotopic identification of the sources of lead contamination for white storks (*Ciconia ciconia*) in a marshland ecosystem (Doñana, S.W. Spain). *The science of the total environment*, 300:81-86.

Meharg AA, Shore RF, French MC och Osborn D. 1997. Dioxin and furan residues in wood mice (*Apodemus Sylvaticus*) following a large scale polyvinyl chloride (PVC) fire. *Environmental pollution*, 97(3):213-220.

- Meharg AA, Wright J Dyke H och Osborn D. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dispersion and deposition to vegetation and soil following a large scale chemical fire. *Environmental pollution*, 99:29-36.
- Meyer V. 2007. *GIS-based multicriteria analysis as decision support in flood risk management*. FLOODsite rapport T10-07-07.
- Nammari DR, Hogland W, Nimmermark MM och Moutavtchi V. 2004. Emissions from a controlled fire in municipal solid waste bales. *Waste management*, 24(1):9-18.
- Niemi JV, Tervahattu H, Vehkamäki H, Kulmala M, Koskentalo T, Sillanpää M och Rantamäki M. 2004. Characterization and source identification of a fine particle episode in Finland. *Atmospheric environment*, 38:5003-5012.
- Okay OS, Tolun L, Telli-Karakoc F, Tüfekci V, Tüfekci H och Morkoc E. 2001. Izmit Bay (Turkey) ecosystem after Marmara earthquake and subsequent refinery fire: the long-term data. *Marine pollution bulletin*, 42(5):361-369.
- Olsen SI, Christensen FM, Hauschild M, Pedersen F, Larsen HF och Törslöv J. 2001. Life cycle impact assessment of chemicals – a methodological comparison. *Environmental impact assessment review*, 21:385-404.
- Pereyra AM och Guidice CA. 2009. Flame-retardants impregnants for woods based on alkaline silicates. *Fire safety journal*, 44:497-503.
- Persson K och Destouni G. 2009. Propagation of water pollution uncertainty and risk from the subsurface to the surface water system of a catchment. *Journal of hydrology*, 377:434-444.
- Porter D, Metcalfe E och Thomas MJK. 2000. Nanocomposite fire retardants – A review. *Fire and materials*, 24:45-52.
- Powell T. 2006. *The Buncefield investigation*. Progress report. ([www.buncefieldinvestigation.gov.uk/report.pdf](http://www.buncefieldinvestigation.gov.uk/report.pdf))
- Pöllänen R, Valkama I och Toivonen H. 1997. Transport of radioactive particles from the Chernobyl accident. *Atmospheric environment*, 31(21):3575-3590.
- Reible D. 2009. Hurricane Katrina – environmental and engineering concerns. Ur: Illangaskere m fl (red.), *Decision support for natural disasters*. NATO Science for peace and security series C - Environmental security, sid 29-46.
- Räddningsverket 2007. *Utsläpp från olyckor - Påverkan på möjligheten att uppnå miljökvalitetsmålen Giftfri miljö och Grundvatten av god kvalitet*. Räddningsverket, P20-478/07.

Sapkota A, Symons JM, Kleissl J, Wang L, Parlange MB, Ondov J, Breyse PN, Diette GB, Eggleston PA och Buckley TJ. 2005. Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore City. *Environmental science and technology*, 39:24-32.

Satyanand T. 2008. Aftermath of the Bhopal accident. *The lancet*, 371:1900.

Scott Å. 1998. Environment-accident index: validation of a model. *Journal of hazardous materials*, 61:305-312.

Scott Å, Tysklind M och Fångmark I. 2002. Selection of a representative set of chemical accidents from a complex data matrix for the development of environment-accident index. *Journal of hazardous materials*, A91:63-80.

Scott Andersson Å, Stjernström O och Fångmark I. 2005. Use of questionnaires and an expert panel to judge the environmental consequences of chemical spills for the development of an environmental-accident index. *Journal of environmental management*, 75(3):247-261.

Scott Andersson Å, Tysklind M och Fångmark I. 2007. A method to relate chemical accident properties and expert judgements in order to derive useful information for the development of Environmental-Accident Index. *Journal of hazardous materials*, 147:524-533.

Sharma DC. 2002. Bhopal's health disaster continues to unfold. Editorial. *The lancet*, 360:859.

Shorten CV, Galloway J, Krebs JG och Fleming RS. 2002. A 12-year history of hazardous materials incidents in Chester County, Pennsylvania. *Journal of hazardous materials*, A89:29-40.

Sillanpää M, Saarikoski S, Hillamo R, Pennanen A, Makkonen U, Spolnik Z, van Grieken R, Koskentalo T och Salonen RO. 2005. Chemical composition, mass size distribution and source analysis of long-range transported wildfire smokes in Helsinki. *Science of the total environment*, 350:119-135.

Simonson M, Andersson P, Emanuelsson V och Stripple H. 2003. A lifecycle assessment (LCA) model for cables based on the fire-LCA model. *Fire and materials*, 27:71-89.

Simpkins AA. 2005. Method for estimating ingestion doses to the public near the Savannah River Site following an accidental atmospheric release. *Health physics*, 88(2):133-138.

Srinivas H och Nakagawa Y. 2008. Environmental implications for disaster preparedness: Lessons learnt from the Indian Ocean tsunami. *Journal of environmental management*, 89:4-13.

Sudmeier-Rieux K, Masundire H, Rizvi A och Rietbergen S. 2006. *Ecosystems, livelihoods and disasters – an integrated approach to disaster risk management*. Ecosystems management series No. 4. The world conservation union (IUCN).

Suter GW, Norton SB och Barnthouse LW. 2003. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the red book ancestor. *Human and ecological risk assessment*, 9(5):1349-1360.

Suter GW, Vermiere T, Munns Jr WR och Sekizawa J. 2005. An integrated framework for health and ecological risk assessment. *Toxicology and applied pharmacology*, 207:S611-S616.

Tanzarella C, Degrassi F, Cristaldi M, Moreno S, Lascialfari A, Chiuchiarelli G och Ieradi LA. 2001. Genotoxic damage in free-living Algerian mouse (*Mus spretus*) after the Coto Doñana ecological disaster. *Environmental pollution*, 115:43-48.

Vautard A, Ciais P, Fisher R, Lowry D, Bre´on FM, Vogel F, Levin I, Miglietta F och Nisbet E. 2007. The dispersion of the Buncefield oil fire plume: An extreme accident without air quality consequences. *Atmospheric environment* 41:9506–9517.

Visentin S. 2006. Lessons learned from industrial chemical accidents: Italian and international initiatives. Ur: Simeonov L och Chirila E (red), *Chemicals as intentional and accidental global environmental threats*, sid 29-44. Springer.

Wiley RJ, Crowl DA och Lepkowski W. 2005. The Bhopal tragedy: its influence on process and community safety as practiced in the United States. *Journal of loss prevention in the process industry*, 18:365-374.

Willis HH, DeKay ML, Morgan MG, Florig HK och Fischbeck PS. 2004. Ecological risk ranking: Development and evaluation of a method for improving public participation in environmental decision making. *Risk analysis*, 24(2):363-377.

Wobst M, Wichmann H och Bahadir M. 1999. Surface contamination with PASH, PAH and PCDD/F after fire accidents in private residences. *Chemosphere*, 38(7):1685-1691.