

N.O.Jørgensen
Institut for Planlægning, DTU
Lars Brockhoff
LBH-Consult
Hans Rømer
COWI
Bo Grevy
Banestyrelsen, Rådgivning
H.J.Styhr Petersen

Risiko ved transport af farligt gods

1. Baggrund

Dette projekt, som er finansieret af Transportrådet, er forløbet i to faser. Projektets første fase bestod i en kortlægning af de transporterede mængder af farligt gods i Danmark på vej, med jernbane, med skib og i rør, se litt. 1. Begrebet ”farligt gods” har været betragtet som materialer, der i henhold til en FN-konvention er klassificeret som farlige.

I den anden og sidste fase har formålet været at forsøge at beskrive den risiko, som transporter af farligt gods på vej og med jernbane påfører det danske samfund. Normalt beskrives risiko som:

$$\text{Risiko} = \text{sandsynlighed for uheld} \cdot \text{uheldets konsekvenser}$$

Risikoen beskrives her som sandsynligheden for uheld med udslip af farligt gods under transport multipliceret med uheldets konsekvenser. Beskrivelsen af konsekvenserne af uheld kan være detaljerede i form af en sandsynlighedsfordeling på antal dødsfald, forventede materielle skader og skader i det ydre miljø som følge af udslip af farligt gods under transport. Der ses her alene på tanktransporter og ikke på farligt stykgods. Der ses ikke på skader under omladning eller ved udsivning fra holdende køretøjer, fx fra jernbanevogne, som står på et rangerterræn.

2. Modeller for uheldsrisiko

2.1 Model for uheldsrisiko i godstransport på jernbane

Modeludvikling

Ved arbejdets start forelå der ingen egentlig model for jernbaneuheld - svarende til modellen for uheld i vejtrafik, se afsnit 2.2 - som kunne lægges til grund for en risikomodel for transport af farligt gods. Det var derfor nødvendigt at udvikle en model.

DSB gav adgang til en række data om rapporterede uheld i perioden 1976 - 1995 og om trafikken på de enkelte banestrækninger. Da interessen var knyttet til baner som afvikler godstrafik, blev hele S-togsnettet trukket ud af analysen. Der blev kun analyseret på uheld under egentlig trafik, dvs kun på uheld på strækninger og på hovedspor gennem stationer og ikke fx

på uheld med specialkøretøjer eller på rangeruheld. DSB vurderede, at trafikken på de betragtede dele af nettet havde været stort set konstant i perioden, dvs der blev ikke foretaget en detaljeret opgørelse over trafikken år for år.

Uheldsmaterialet var på forhånd opdelt på afsporinger og kollisioner og på uheld med personførende tog og godstog. Uheldene kunne for næsten alle vedkommende stedfæstes til bestemte strækninger eller stationer. Uheldsmaterialets størrelse fremgår af tabel 1.

Tabel 1. *Det samlede datamateriale fra DSB, 1976 - 95*

		Persontog	Godstog	Total
Stationer	Afsporing	19	69	88
	Kollision	32	17	49
Strækninger	Afsporing	8	4	12
	Kollision	6	5	11

Udgangspunktet for analysen var nogle hypoteser om, at uheldsrisikoen ville afhænge af en række tekniske forhold. Man kunne fx formode, at sikkerheden på strækninger var højere ved 2 spor end ved 1 spor for så vidt angår kollisioner, eller man kunne formode, at store og komplicerede stationer ville have en højere uheldsfrekvens end små stationer. Det var ikke muligt ud fra de tilgængelige data at opstille en direkte beregning af, om frekvenserne var afhængige af ATC (Automatic Train Control).

Der blev herefter opstillet en model for uheldsfrekvenserne, defineret som antal registrerede uheld pr 10 millioner togkilometer for strækninger eller pr 10 millioner togpassager for stationer. Talmaterialet blev opdelt på følgende kategorier, for hvilke der udregnedes uheldsfrekvenser:

- Afsporinger / kollisioner
- Strækninger med 1 spor / 2 spor
- Små stationer / store stationer / strækninger
- Godstog / personførende tog

Der kunne altså beregnes $2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 = 24$ frekvenser.

De 24 frekvenser, som kunne beregnes direkte, har hver for sig en betydelig usikkerhed. I stedet for blot at anvende dem ukritisk i en model er der anvendt en lidt anden tankegang. Idéen er, at det kunne tænkes, at virkningerne af de registrerede forhold er uafhængige af hinanden, fx at virkningen af om en station er lille eller stor, er den samme uanset andre forhold. Derved fremkommer en såkaldt multiplikativ model, en modeltype, som ofte har været anvendt i uheldsstudier, (se fx litt 9). Det er dog ikke undersøgt her, om datamaterialet faktisk følger en multiplikativ model. Modellen er sådan opbygget, at der først udregnes en grundfrekvens for afsporinger og en for kollisioner på stationer og på strækninger, se tabel 2. I tabellen er endvidere anført de bagved liggende uheldstal for hver frekvens.

Derefter beregnes et sæt korrektionsfaktorer, som multipliceres på middelfrekvenserne i tabel 2, således at den ønskede frekvens fremkommer, se tabel 3.

Tabel 2. *Estimerede totalfrekvenser for afsporinger og kollisioner på strækninger og stationer. Personførende tog + godstog.*

	Afsporinger		Kollisioner	
	Stationer	Strækninger	Stationer	Strækninger
Frekvens · 10 ⁷	7,4	0,15	4,1	0,14
Uheldstal i beregning	88	12	49	11

Tabel 3. *Korrektionsfaktorer i forhold til middelfrekvenserne i tabel 2.*

		Person	Gods	1 spor	2 spor	Lille station	Stor station
Station	Afsporing	0,3	3,6			0,4	2,5
	Kollision	0,8	1,6			0,4	2,5
Strækning	Afsporing	0,8	1,7	1,4	0,7		
	Kollision	0,7	2,3	0,1	1,7		

Fordelen ved denne tankegang er for det første, at man så langt som muligt benytter de største tal fra datamaterialet. Derefter opstilles ud fra langt mindre tal korrektionsfaktorer. Disse faktorer kan fx diskuteres med særligt sagkyndige, som kan vurdere, om de overhovedet er sandsynlige eller om de evt. helt skal bortfalde. Opstillingen af de beregningsmæssige frekvenser bliver herved gennemskuelig. Ønskes fx frekvensen for kollisioner for godstog på en stor station pr 10 millioner togpassager beregnes den som middelfrekvensen for kollisioner på stationer multipliceret med korrektionsfaktoren for store stationer og med godstogs faktoren, dvs

Kollisionsfrekv. for godstog på stor station = $4,1 \cdot 1,6 \cdot 2,5 = 16$ kollisioner / 10⁷ togpassager

Da det her drejer sig om uheldsfrekvenser for transport af farligt gods, er det alene godstogsuheldene, som er nødvendige for de videre beregninger, se tabel 4.

Tabel 4. *Estimerede uheldsfrekvenser for godstog pr 10 millioner tog-km eller pr 10 millioner togpassager. Afrundet til 2 betydende cifre.*

	Stationer		Strækninger	
	Lille	Stor	1 spor	2 spor
Afsporing	11	67	0,37	0,18
Kollision	2,8	16	0,036	0,55

Som illustration af metoden angives i tabel 5 de tilsvarende tal for personførende tog.

Tabel 5. *Estimerede uheldsfrekvenser for personførende tog pr 10 millioner tog-km eller pr 10 millioner togpassager. Afrundet til 2 betydende cifre.*

	Stationer		Strækninger	
	Lille	Stor	1 spor	2 spor
Afsporing	0,84	5,1	0,18	0,90
Kollision	1,5	8,4	0,011	0,16

Andre forhold vedr. risiko i jernbanetransport.

Det ligger klart ved en sammenligning mellem tabel 4 og 5, at *uheldsfrekvenserne ved persontransport er væsentlig lavere end ved godstransport*, omkring 5 gange lavere i gennemsnit

men med betydelige variationer over de forskellige kategorier i tabellerne. Der kendes ikke umiddelbart nogen forklaring på risikoforskellene. Forholdet er tilstrækkeligt underbygget til, at en dyberegående undersøgelse bør foretages.

Der er en tendens til, at *uheldsfrekvensen har været stigende gennem de 20 år (1976 - 95)*, som datamaterialet omfatter. Ser man alene på det samlede antal uheld, er der ca 3 gange så mange uheld i de sidste 10 år som i de første. Der er imidlertid en vis usikkerhed om antagelsen om konstant trafik i perioden, ligesom der muligvis er opnået en højere rapporteringsgrad i perioden. Forskellene er derfor måske reelt mindre end tallene umiddelbart viser. Der er derfor anvendt gennemsnit for alle årene, da man derved har det størst mulige datagrundlag. Det bør dog undersøges, om der se sket er reel forringelse af sikkerheden igennem perioden.

Sandsynligheden for at en godsvogn med farligt gods impliceres i uheld

Selve risikomodelen, som den er formuleret i det foregående, beskriver risikoen for, at et godstog impliceres i et uheld. For at estimere risikoen for, at en vogn med farligt gods havarerer, må man kende andelen af vogne med farligt gods i et godstog samt risikoen for, at disse vogne afspores i et uheld. Ud fra tilgængelige data samt mindre undersøgelser i projektet anslås det, at sandsynligheden for, at mindst én tankvogn med farligt gods impliceres er 27%, givet at der er indtruffet en afsporing eller en kollision. Endvidere anslås det, at 10% af de uheld, som berører 1 tankvogn med farligt gods, vil berøre yderligere 1 altså i alt 2 tankvogne med farligt gods. Der ses bort fra risikoen for, at mere end 2 tankvogne er impliceret i et uheld.

Konklusion vedr. risikomodelen for jernbanetransport.

Den opstillede model (litt. 3) er direkte anvendelig til at bestemme uheldsfrekvenser for givne transporter på givne strækninger og stationer. Modellen kan forventes at give gode gennemsnitsværdier, og den vil afspejle de forskelle i risiko, der optræder ved alternative ruter. Dette var målet med modeludviklingen.

De forskelle i uheldsfrekvenser, som blev fundet i denne undersøgelse, indikerer, at der vil kunne opnås betydelige reduktioner i uheldsfrekvenserne. En nøjere analyse vil dog kræve, at datagrundlaget forbedres.

2.2 Model for uheldsrisiko i vejtransport

Til beskrivelse af risikoen ved vejtransport benyttes først en model for hvor mange lastbiler, der impliceres i uheld. Dette tal findes ud fra en generel model for antal politiregistrerede uheld på stats- og amtsveje. Her benyttes de klassiske udtryk, som har været anvendt i Danmark i en længere årrække:

$$\text{For strækninger:} \quad U = L \cdot a \cdot N^p$$

$$\text{For kryds:} \quad U = a \cdot N_1^{p1} \cdot N_2^{p2}$$

hvor U er antal uheld pr år, L er strækningslængde, N er årsdøgntrafik mens a og p er parametre bestemt ved regression i datamaterialerne. Værdierne for a og p afhænger af vejtype og krydstype. Vejtype dækker over vejens tværsnit: antal spor, evt. midterrabat, tilstedeværelse af cykelsti samt om vejen ligger i eller udenfor bymæssig bebyggelse. Krydstypen dækker

over fx antal ben, kanalisering og reguleringsform (signal- eller vigepligtsregulering) samt i eller udenfor bymæssig bebyggelse.

Der udvikles derefter delmodeller for antallet af uheldsimplicerede lastbiler over 6t ud fra årsdøgnetrafik og lastbilprocent. Modellernes parametre er også afhængige af vejtype og krydstype. Uheldsimplicerede tunge lastbiler pr år kan beskrives således:

For strækninger:
$$\text{ImplLB} = L \cdot a \cdot N^p \cdot (c \cdot N + d) \cdot b \cdot (\text{LB}\%)$$

For kryds:
$$\text{ImplLB} = a \cdot N_1^{p1} \cdot N_2^{p2} \cdot c \cdot b \cdot (\text{LB}\%)$$

hvor ImplLB er implicerede tunge lastbiler, (LB%) er lastbilprocent, b, c og d er regressionskoefficienter, som afhænger af vejtypen, og symbolerne i øvrigt er som ovenfor. Værdierne for b, c og d findes tabelleret for vejtyper og krydstyper (litt 3).

Fra projektets fase 1 kendes procenten af tunge lastbiler, som fører farligt gods, fordelt på hele landevejsnettet. Det er antaget her, at disse lastbilers risiko for at blive impliceret i uheld er den samme som for andre lastbiler. Man kan derfor multiplicere ImplLB direkte med procenten af biler, som fører farligt gods. Der er støtte for denne antagelse i en mindre dansk undersøgelse (litt 9). En senere canadisk rapport (litt 7) med data fra flere lande som grundlag angiver imidlertid, at de lastbiler, som medfører farligt gods, har en uheldsfrekvens, der er noget lavere: ca halvdelen af frekvensen for øvrige lastbiler.

Konklusion vedr. risikomodellen for vejtransport.

Formålet med modellen er at kunne belyse, hvordan risikoen for skader på mennesker og miljø ved en given transport påvirkes gennem forskelligt rutevalg. Modellen er velegnet til dette formål.

3. Udslipssandsynligheder og udslipsmængder

Sandsynlighederne for udslip givet et uheld, er baseret på erfaringer refereret i litteraturen. Sandsynlighederne beskrives kort i det følgende, hvor der skelnes mellem tyndvæggede og tykvæggede tanke samt transportform og trafikmiljø.

Jernbanetransport

I rapporten er opstillet betragtninger over, hvor store sandsynligheder der er for udslip, givet at en eller flere vogne impliceres i uheld. Fx antages det, at sandsynligheden for stort udslip fra den første implicerede tankvogn er 1 % for tyndvæggede og 0.5 % for tykvæggede tanke. Det antages endvidere, at ved store udslip vil tanken tømmes helt i 50 % af tilfældene og tømmes halvt i de resterende 50 % af tilfældene.

Vejtransport

Ud fra statistiske vurderinger af mere end 17000 lastbiluheld i Danmark har Brockhoff (litt. 8) anslået de i tabellen angivne betingede sandsynligheder for udslip fra lastbiler.

Tabel 6. *Betingede sandsynligheder for udslip fra tankbiler*

	byområde	landevej	motorvej
Tyndvæggede tankbiler	0,05	0,07	0,09
Tykvæggede tankbiler	0,01	0,02	0,03

Givet, at der er sket et udslip angives en fordeling af udslipstørrelser. Disse baseres på litteraturreferencer (litt 8). Til brug for de senere konsekvensberegninger anvendes de talværdier, som er angivet i tabel 7. Tallene modsvarer en gennemsnitlig udslipsmængde på 34% af tankens indhold.

Tabel 7. Antagne udslipsmængder, givet et uheld med udslip

Andel af tankens indhold der slippes ud	Betinget sandsynlighed
10%	0,60
50%	0,20
90%	0,20

4. Konsekvensmodeller

4.1 Humane konsekvenser

Modellen for humane konsekvenser ser alene på dræbte personer. Der ses ikke på tilskadekomne personer, og der ikke ses heller ikke fx. på evakueringer eller midlertidige afbrydelser af trafikale forbindelser. Metoden er hentet fra litt. 8. Modellen baseres på et "fatality indeks", hvor antal omkomne kan udtrykkes ved

- stoffets farlighed
- udslippets størrelse
- befolkningstætheden i området

I metoden udtrykkes antal dræbte personer, N , ved udslipsmængden W (ton) og to koefficienter β og n ved formlen:

$$N = \beta \cdot W^n$$

Der er opstillet koefficientværdier for β og n svarende til to giftige gasser nemlig klor og ammoniak og 3 brændbare stoffer nemlig flydende LPG, benzin og dieselolie. Ud fra empiriske data er det anslået, at n kan sættes = 1 for de to gasser og $n = 1/2$ for de tre brændbare væsker. β - værdierne afhænger af befolkningstætheden. Tabel 8 angiver værdierne

Tabel 8. *De beregnede værdier af β*

	Byområde	Forstad / Industri	Landområde
Klor	5,5	0,55	0,055
Ammoniak	1,2	0,12	0,012
LPG	9,8	3,1	1,0
Benzin	4,1	1,3	0,4
Dieselolie	4,1	1,3	0,4

For at beskrive fordelingen af antal dræbte, benyttes en teknik, hvor man beregner dels sandsynligheden for, at mindst 1 person omkommer ($P(N \geq 1)$), dels beregner det gennemsnitlige antal dødsfald (Gns. N). Herudfra kan fordelingen af antallet af dræbte fastlægges. Følgende modelparametre anvendes, se tabel 9.

Tabel 9. Modelparametre, se litt. 8

	Byområde		Industri - forstad		Landområde	
	P(N \geq 1)	Gns. N	P(N \geq 1)	Gns. N	P(N \geq 1)	Gns. N
Klor	0,60	5,5 · W	0,38	0,55 · W	0,16	0,055 · W
Ammoniak	0,46	1,2 · W	0,24	0,12 · W	0,012	0,012 · W
LPG	0,23	9,8 · W ^{1/2}	0,18	3,1 · W ^{1/2}	0,13	1,0 · W ^{1/2}
Benzin	0,13	4,1 · W ^{1/2}	0,10	1,3 · W ^{1/2}	0,064	0,4 · W ^{1/2}
Diesel	0,035	4,1 · W ^{1/2}	0,026	1,3 · W ^{1/2}	0,017	0,4 · W ^{1/2}

4.2 Miljøkonsekvenser

I projektet er der udviklet en metode til kvantificering af mulige miljøskader hidrørende fra udslip af farligt gods.

Det vurderes, at udslip af gasser normalt har meget ringe betydning for det ydre miljø. Det er derfor udslip af væsker, som er behandlet i detaljer. Problemet ved væskeudslip er:

- hvor løber væsken hen?
- hvilke konsekvenser har det for miljøet?

Projektet rummer derfor en beskrivelse af de typiske afløbsforhold for danske veje og jernbaner. For bygader og nyere vejanlæg vil vædskeudslip ofte blive ledt i lukkede ledninger til renseanlæg, hvor en del af udslippene kan opfanges, så det ikke ledes direkte til søer og åer. Men ved de fleste jernbaner og mange vejanlæg ledes afløbsvand og eventuelle andre væsker til grøfter o.l. hvorfra vandet ledes til recipienter, hvor der kan ske forurening af overfladevand, eller der sker nedsivning fra grøfter til grundvand.

Jord- og grundvandsforurening

I de tilfælde, hvor der vil ske nedsivning af farlige stoffer i jorden, kan man normalt ud fra data om udslipsmængden og jordens permeabilitet skønne over den forurenede jordmængde, og om der er risiko for grundvandsforurening.

Miljøkonsekvensrapporten (litt. 2) anlægger det synspunkt, at skadernes omfang ofte kan måles økonomisk i form af de udgifter, som skal afholdes, for at de indtrådte skader kan afhjælpes. Synspunktet forudsætter, at der ikke er sket uoprettelige skader, fx i form af udryddelse af en truet plante, såsom Frueskoen i Rold. Det vil ofte være muligt at vurdere omkostningen ved at bortgrave forurenede jord eller at gennemføre en afværgeboring, som kan forhindre en forurening af grundvandet. Rapporten indeholder eksempler på skønnede omkostninger ved spild af benzin, phenol eller svovlsyre i forskellige mængder og i forskellige jordtyper.

Forurening af overfladevand

Miljøkonsekvenser for overfladevandsrecipienter vurderes ved HAZARD-IMPACT metoden. Metoden bygger på data om økotoksikologi, bionedbrydelighed mv. Metoden består i, at der beregnes en HAZARD-værdi for stoffets skæbne og dets effekt i miljøet. Det kombineres med en faktor for udslipstørrelsen til en IMPACT-værdi.

IMPACT-værdien siger noget om, hvor skadeligt et udslip er for fisk, mikroorganismer mv, men den kan ikke omsættes til værdier, som er lettere at fortolke. Resultaterne er bedst anvendelige ved interne sammenligninger eller til en bedømmelse af hvilke stoffer eller afløbsruter, der giver store risikobidrag. Metoden tager ikke hensyn til, at overfladevand i mange tilfælde anvendes som drikkevand.

De beregninger af miljøkonsekvenser, som omtales i afsnit 5 om GIS implementering, forudsætter derfor, at man har i det mindste et overordnet billede af jordbundsforholdene og grundvandsforholdene samt af vandløbenes tilstand. Det har ikke i projektføreløbet været muligt at indhente sådanne data fra hele landet.

5. GIS- implementering

Som en illustration af konsekvenserne af skader som følge af uheld med udslip af farligt gods er det overordnede vejnet og jernbanenettet i Danmark indlagt i et GIS. Dette system indeholder tillige oplysninger om befolkningstætheder, jordbundsforhold, vandløbsforhold og fredede områder. Systemet blev beskrevet ved et indlæg ved Trafikdagene '98 (litt. 5). Ud fra disse data kan der beregnes forventede skader og deres virkninger på mennesker og miljø.

Ved at indlægge den samlede kendte transport af farligt gods på veje og jernbaner i Danmark ud fra undersøgelserne i projektets fase 1, kan man estimere et forventet antal ulykker og ulykkernes konsekvenser for et givet geografisk område, fx hele landet. Fig 1 viser et eksempel på en fN-kurve for dødsfald som følge af ulykker med farligt gods på veje i hele landet.

Endvidere kan man opstille beregninger af de forventede miljømæssige skader fra udslip af farligt gods. Også disse kan med fordel opdeles geografisk, således at det kan vurderes, hvor der er anledning til at foretage særlige miljøbeskyttelsesforanstaltninger, eller om der er behov for et særligt beredskab.

6. Litteraturreferencer.

Litteratur 1 - 6 er rapporter i projektet, som er udkommet, eller som er under udsendelse:

1. Brockhoff, L., Jørgensen, N.O., Styhr Petersen, H.J., Wiuff, R.(1994): Transport af farligt gods i Danmark, Transportrådet, Notat nr. 94 · 01.
2. COWI: Miljøkonsekvenser fra uheld under vej- og jernbanetransport af farligt gods, Marts 1997.

3. Brockhoff, L., Grevy, B., Jørgensen, N.O., Styhr Petersen, H.J. Rømer, H.G. : Vej- og jernbanetransport af farligt gods - Uheldsfrekvenser og udslipssandsynligheder, Udsendes 1999.
4. Brockhoff, L., Grevy, B., Jørgensen, N.O., Styhr Petersen, H.J., Rømer, H.G.: GIS-implementering af risikomodeller for transport af farligt gods i Danmark, Udsendes 1999.
5. Jørgensen, N.O., Grevy, B. (1998): Transport af farligt gods, Trafikdage på Aalborg Universitet '98, p. 859 - 867.
6. Rømer, H.G., Brockhoff, L., Grevy, B., Jørgensen, N.O., Styhr Petersen, H.J.: Risici ved transport af farligt gods i Danmark, Udsendes 1999
7. Saccomanno, F.F., Button, N.P., Al Assar, R.(1998): Release and fire incidents rates for the transport of dangerous goods through road tunnels and surface routes, Institute of risk research, Waterloo, Canada.
8. Brockhoff, L.H. (1992): Design of a risk management model for transport of dangerous goods, Ph.D-afhandling IK/DTU.
9. Bernhoft, I.M. mfl. (1990): Dødsuheld med lastbiler i 1989. Rådet for Trafiksikkerhedsforskning, Arbejdsnotat.
10. Rådet for Trafiksikkerhedsforskning (1970): Virkningerne af de periodiske hastighedsbegrænsninger i årene 1961 - 1964. Rapport 3.

Fig. 1. Eksempel på fN-diagram

