

Miljøprojekt Nr. 648 2001

Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening

Metode til risikovurdering af gasproducerende lossepladser

Lena Nilausen, Tage Vikjær Bote og Kirsten Sandberg Bloch
COWI Rådgivende Ingeniører A/S

Peter Kjeldsen
Danmarks Tekniske Universitet, Miljø og Ressourcer

Claus Erik Andersen
Forskningscenter Risø, afd. for Nuklear Sikkerhedsforskning

Lizzi Andersen
DHI - Institut for Vand og Miljø

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	9
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	11
SUMMARY AND CONCLUSIONS	15
1 INDLEDNING	18
1.1 FORMÅL	19
1.2 RAPPORTENS OPBYGNING	19
1.3 AFFALDSDEPONERINGSANLÆG	20
2 ULYKKER FORÅRSAGET AF LOSSEPLADSGAS	23
2.1 INTRODUKTION	23
2.2 RISICI VED LOSSEPLADSGAS	23
2.3 ULYKKE PÅ ELLER VED LOSSEPLADS	24
2.3.1 Gasproduktion	25
2.3.2 Gasmigration	26
2.3.3 Gasindtrængning i bygninger	27
2.3.4 Antændelse af gas	28
2.4 PRINCIPPER FOR RISIKOVURDERING	29
2.4.1 Danske- og udenlandske erfaringer	29
2.4.2 Risikovurderingskoncept	29
2.5 RISIKOVURDERINGENS ANVENDELIGHED	30
3 RISIKOVURDERING VED ANVENDELSE AF BARRIEREDIAGRAMMER	32
3.1 INDLEDNING	32
3.2 OPBYGNING AF BARRIEREDIAGRAMMER	33
3.3 ÅRSAGER OG FORUDSÆTNINGER	34
3.3.1 Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer	34
3.3.2 Der er skiftende migrationsfremmende forhold	36
3.3.3 Der er konstante migrationsfremmende forhold	37
3.3.4 Bygning/Bygværk med mennesker til stede	39
3.4 BARRIERER	39
3.4.1 Begrænsning af udsivning fra losseplads	40
3.4.2 Gasmigration begrænses uden for losseplads	40
3.4.3 Begrænsning af gasindtrængen	43
3.4.4 Begrænsning af gaskoncentration i bygning/bygværk	45
3.4.5 Begrænsede antændelsesmuligheder	46
3.5 VURDERING AF SIKKERHEDSNIVEAU	46
3.5.1 Konsekvensvurderinger	46
3.5.2 Sikkerhedsniveau	47
3.5.3 Vurdering af sikkerhed	48
4 UNDERSØGELSER AF LOSSEPLADSER	49
4.1 INDLEDNING	49

4.2	ORIENTERINGSFASEN	49
4.2.1	<i>Formål</i>	50
4.2.2	<i>Dataindsamling</i>	50
4.3	INDLEDENDE UNDERSØGELSE	51
4.4	SUPPLERENDE GASUNDERSØGELSER	52
5	REFERENCER	53

BILAGSFORTEGNELSE

Bilag 1 Lossepladsgas

1 INDLEDNING

2 FYSISK-KEMISK KARAKTERISTIKA AF LOSSEPLADSGAS

2.1 BRANDBARE GASBLANDINGER

2.2 KULDIOXID

2.3 BETYDNING AF GASKONCENTRATIONER I BYGNING

3 GASPRODUKTION

3.1 METANPRODUKTION

3.2 GASPRODUKTIONS-RATER

3.3 VURDERING AF GASPRODUKTIONEN

4 GASMIGRATION

4.1 MIGRATIONSMEKANISMER

4.2 FORHOLD DER INFLUERER PÅ GASMIGRATIONEN

4.3 VURDERING AF GASMIGRATIONSFREMMENDE FORHOLD

4.4 VURDERING AF HORIZONTAL GASMIGRATION

5 INDTRÆNGNING AF GAS I BYGNINGER

5.1 GASINDTRÆNGNING

5.2 KONCENTRATION AF LOSSEPLADSGAS I BYGNINGER

6 REFERENCER

Bilag 2 Undersøgellesstrategi

1 INDLEDNING

2 ORIENTERINGSFASEN

3 INDLEDENDE UNDERSØGELSER

3.1 UNDERSØGELSES-PROGRAM

3.2 PRØVETAGNING

3.3 MÅLEPARAMETRE

3.4 FEJLMÅLINGER

3.5 GASKONCENTRATIONER

4 SUPPLERENDE UNDERSØGELSE

4.1 UNDERSØGELSE AF GASMIGRATION

4.2 UNDERSØGELSE AF GASINDTRÆNGNING I BYGNINGER

5 REFERENCER

Bilag 3 Barrierediagrammer

1 BARRIEREDIAGRAMMETODEN, TEORI

- 1.1 INDLEDNING
- 1.2 FORDELE OG ULEMPER VED METODEN
- 1.3 OPBYGNING AF BARRIEREDIAGRAMMER
- 1.4 POINT
- 1.5 VURDERING AF SIKKERHEDSNIVEAU

2 GENERELLE BARRIEREDIAGRAMMER

- 2.1 INDLEDNING

3 EKSEMPLER PÅ ANVENDELSE

- 3.1 INDLEDNING
- 3.2 LOKALE I STUEPLAN I ERHVERVSBYGGERI (1A)
- 3.3 KRYBEKÆLDER UNDER ERHVERVSLOKALER. EKSPLOSION SKYLDES
ELINSTALLATIONER (1B)
- 3.4 KRYBEKÆLDER UNDER ERHVERVSLOKALER. EKSPLOSION SKYLDES
HÅNDVÆRKER I KRYBEKÆLDER (1C)
- 3.5 BOLIG PÅ LILLE LOSSEPLADS (1D)
- 3.6 BOLIGBLOK PLACERET UDEN FOR STOR LOSSEPLADS (2A)
- 3.7 BOLIG PLACERET UDEN FOR STOR LOSSEPLADS (2B)
- 3.8 GRAVEARBEJDE PÅ LOSSEPLADS (3A)
- 3.9 REPARATIONSARBEJDE I BRØND PÅ LOSSEPLADS (3B)

4 REFERENCER

Bilag 4 Resume af forprojektet

1 INDLEDNING

- 1.1 FORMÅL
- 1.2 BAGGRUND

2 GASEKSPLOSIONSULYKKER

3 GASLOSSEPLADSER I DANMARK, STATUS

4 UDLANDET

5 RISIKOVURDERING

- 5.1 GASDANNELSE
- 5.2 GASSPREDNING
- 5.3 GASINDTRÆNGEN
- 5.4 BETINGELSER FOR GASEKSPLOSION

6 RISIKOANALYTISKE FORHOLD

Bilag 5 Danske og udenlandske erfaringer

1 INDLEDNING

2 DANSKE ERFARINGER

- 2.1 SPØRGESKEMAER
- 2.2 KENDSKAB TIL GASULYKKER
- 2.3 UNDERSØGELSESMETODIKKER
- 2.4 RISIKOVURDERINGER
- 2.5 AFVÆRGEFORANSTALTNINGER

3 UDENLANDSKE ERFARINGER

- 3.1 SPØRGESKEMAER
- 3.2 KENDSKAB TIL GASULYKKER
- 3.3 UNDERSØGELSESMETODIKKER
- 3.4 RISIKOVURDERINGER
- 3.5 MONITERING OG GRÆNSEVÆRDIER
- 3.6 AFVÆRGEFORANSTALTNINGER

4 BESKRIVELSE AF UDVALGTE ULYKKER

- 4.1 INDLEDNING
- 4.2 GASEKSPLOSION VED LOSCOE, DERBYSHIRE, ENGLAND
- 4.3 GASEKSPLOSION VED SKELLINGSTED, MØRKØV, DANMARK

5 SKADETYPEN

- 5.1 INDLEDNING
- 5.2 KATEGORISERING AF SKADETYPEN
- 5.3 UDVÆLGELSE AF RELEVANTE KONSEKVENSKLASSER

6 REFERENCER

Forord

Denne rapport beskriver et projekt under Teknologipuljen for jord- og grundvandsforurening vedrørende opstilling af en metode til risikovurdering af gasproducerende lossepladser.

Grundlaget for rapporten har været et oplæg fra Miljøstyrelsen. Oplægget er udarbejdet på baggrund af et forprojekt udarbejdet i 1995 /1/. Et resume af forprojektet er givet i bilag 4.

Projektet er udført af COWI under anvendelse af underrådgivere. Arbejdet er således gennemført af en arbejdsgruppe bestående af følgende personer:

- Claus E. Andersen, Forskningscenter Risø
- Nijs J. Duijm, Forskningscenter Risø
- Lizzi Andersen, DHI, Institut for Vand og Miljø
- Peter Kjeldsen, Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet
- Kirsten S. Bloch, COWI, Afd. for Miljø, Arbejdsmiljø og Sikkerhed
- Eva Kragh, COWI, Afd. for Miljø, Arbejdsmiljø og Sikkerhed
- Jens Brendstrup, COWI, Afd. for Bygherrerådgivning og Byggeteknik
- Birgitte Hansen, COWI, Afd. for Jord- og Grundvandsforurening
- Tage V. Bote, COWI, Afd. for Jord- og Grundvandsforurening
- Lena Nilausen, COWI, Afd. for Jord- og Grundvandsforurening (projektleder).

Miljøstyrelsen har nedsat en styregruppe til at følge arbejdet. Styregruppen har bestået af:

- Preben Bruun, Miljøstyrelsen, Jordforureningskontoret (formand)
- Jørgen G. Hansen, Miljøstyrelsen, Husholdningsaffaldskontoret,
- Ove Nielsen, By- og Boligministeriet
- Ole F. Pedersen, Københavns Amt (repræsentant for Amtsrådsforeningen).

Styregruppen har fulgt arbejdet og har medvirket ved diskussion af relevante problemstillinger undervejs i projektførelsen.

Det er Miljøstyrelsens opfattelse, at rapporten repræsenterer, hvad der kan opnås ved implementering af en risikovurderingsmetode for industrielle anlæg i vurderingen af risiko fra lossepladsgas. Projektet er primært rettet mod amternes undersøgelser og afværgeforanstaltninger af nedlagte lossepladser i medfør af Jordforureningsloven. Rapporten indeholder en grundig redegørelse for dannelse og spredning af lossepladsgas, og kan bidrage til en bedre forståelse heraf. Det er således håbet, at amter, konsulenter og eventuelt andre finder at rapporten er en hjælp til deres håndtering af denne type sager.

Sammenfatning og konklusioner

Indledning

I gennem de sidste ca. 10 år har vi i Danmark haft fokus på de risici, som lossepladsgas kan udgøre for bygninger og andre menneskeskabte konstruktioner, der er beliggende på og omkring såvel de idriftværende affaldsdeponier som de nu nedlagte lossepladser. Erfaringerne har vist, at det er vanskeligt at foretage en kvalificeret vurdering af risikoen for gasekspllosion og andre risikoaspekter, som er forbundet med udsivning af lossepladsgas til omgivelserne. Vanskelighederne består bl.a. i, at der er tale om akutte risici, hvorfor det er nødvendigt at foretage risikovurderingen ud fra nogle ekstreme situationer, dvs. under værst tænkelige forhold, og ikke ud fra en gennemsnitsbetragtning. En eventuel gasindtrængning i bygninger o. lign. vil ikke sker med konstant flow, men vil derimod kunne variere meget i løbet af få timer. Da de mekanismer, der styrer gasmigrationen og gasindsivningen i bygninger, ikke kendes i detaljer, er det vanskeligt at opstille en præcis beskrivelse af de værst tænkelige forhold. Risikovurderingen af lossepladsgas adskiller sig således på væsentlige punkter fra risikovurderingen af traditionelle jord- og grundvandsforureninger. Danske erfaringer med risikovurdering af lossepladsgas viser da også, at det ikke umiddelbart er muligt at overføre koncepter fra f.eks. risikovurderinger af miljøfremmede stoffer i poreluften til lossepladsgas.

Både blandt de regionale miljømyndigheder og de rådgivende ingeniører har der været et behov og ønske om, at der blev udarbejdet et koncept for risikovurdering af lossepladsgas. I 1995 fik Miljøstyrelsen udarbejdet et forprojekt til at belyse mulighederne for udarbejdelse af et sådant risikovurderingskoncept, se bilag 4. På baggrund af anbefalingerne i forprojektet iværksatte Miljøstyrelsen et projekt under Teknologiudviklingsprogrammet til udvikling af et risikovurderingskoncept for lossepladsgas. Hovedformålet er primært at udvikle et værktøj til risikovurdering af faren for gasekspllosioner ved bygninger på eller omkring gamle nedlagte lossepladser. Projektet blev iværksat i juni 1999 og afsluttes med denne rapport.

Videnindsamling

Indledningsvis i projektet er der indsamlet oplysninger om dels danske og udenlandske gasulykker, dels erfaringer med risikovurdering af gasmigration (gasudsivning) fra lossepladser. Der er således rettet henvendelse til de 14 amter samt Frederiksberg og Københavns Kommune for at indhente deres erfaringer og strategier med lossepladsgas og herunder også om deres kendskab til ulykker forårsaget af lossepladsgas. Resultaterne fra dataindsamlingen viste bl.a., at der kun foreligger oplysninger om ganske få ulykker i Danmark, og at de faktuelle oplysninger om hver ulykke er meget begrænsede.

Der er søgt indhentet tilsvarende oplysninger hos ca. 70 internationale samarbejdspartnere og kontakter. Besvarelserne viste, at der stadig sker ulykker, specielt på igangværende lossepladser, men at der også sker ulykker i forbindelse med nedlukkede lossepladser. Ligesom i Danmark er der oftest kun meget begrænsede oplysninger om hver ulykke.

Ulykkerne kan på baggrund af oplysningerne opdeles i små og store ulykker. De store ulykker er f.eks. ulykker som gaseksplotionsulykker med varige personskader eller stor materiel skade, medens små ulykker typisk er ulykker, der sker i forbindelse med vedligeholdelsesarbejder, hvor f.eks. håndværkernes værktøj laver

en gnist, som antænder en mindre gasmængde. Ved de små ulykker vil der oftest kun ske mindre personskader som f.eks. forbrændinger. Tidligere har der især været fokus på de store ulykker, men de små ulykker forekommer oftere end de store. Materialet har ikke givet mulighed for at foretage en detaljeret analyse af ulykkesårsagerne, og der er derfor givet en kvalitativ beskrivelse af de registrerede ulykkes-scenarier.

Af det indsamlede materiale fremgår det, at der er relativt få erfaringer med risikovurderinger i relation til lossepladsgas, og der er hverken nationalt eller internationalt modtaget oplysninger om, at andre har udarbejdet et egentligt koncept for risikovurdering. Arbejdet med at indsamle og bearbejde det indsamlede materiale er detaljeret beskrevet i bilag 5.

Basal viden om lossepladsgas

Der findes meget lidt samlet viden i litteraturen om lossepladsgas, om hvordan den dannes og spredes i miljøet. Det er derfor valgt i forbindelse med udarbejdelse af rapporten, at sammenfatte den grundlæggende viden, der er relevant i forbindelse med risikovurdering af lossepladsgas. Der er i hovedrapporten givet en grundlæggende introduktion til hvilke faktorer, der er af afgørende betydning ved risikovurderingen af lossepladsgas, mens der i bilag 1 er givet en mere detaljeret behandling af de enkelte faktorer. De fysisk-kemisk karakteristika for lossepladsgas og forhold vedrørende gasproduktion og gasmigration er gennemgået. Der findes praktisk talt ingen oplysninger i den tilgængelige litteratur om, hvilke mekanismer der styrer lossepladsgassens indtrængning i huse, men i Danmark er der i forbindelse med radon forskningen også forsket i jordgassers indtrængning i bygninger. I forbindelse med nærværende projekt har det derfor været nærliggende, at anvende viden fra radon forskningen ved vurderingen af indtrængen af lossepladsgas i huse. Der henvises til bilag 1 for detaljerede oplysninger.

Risikovurderingskoncept

Det risikovurderingskoncept, der traditionelt anvendes i forbindelse med jord- og grundvandsforureninger, kan som nævnt i indledningen ikke anvendes ved risikovurdering i forbindelse med lossepladsgas, da risikovurderingen af lossepladsgas på en række områder adskiller sig væsentligt fra de risikovurderingsprincipper, der anvendes i forbindelse med traditionelle forureninger. Den grundlæggende ide med nærværende projekt var derfor at anvende en anden indfaldsvinkel til risikovurderingen og i stedet anvende nogle af de værktøjer, som benyttes i forbindelse med f.eks. risikovurdering af kemiske industrier, off-shore og større trafik anlæg. Et af disse værktøjer er barrierediagrammetoden, som er fagligt funderet og udmærker sig ved på en overskuelig form at visualisere selv meget komplicerede risikovurderinger.

På baggrund af en gennemgang af de grundlæggende forhold, der har indflydelse på gasproduktion, gasmigration og gasindtrængen i bygninger, har det vist sig, at der er en lang række sammenfaldende forhold der gør, at der kan opstå en gaseksplosionsrisiko. Dette er med udgangspunkt i barrierediagrammetoden beskrevet i et koncept til risikovurdering af de gasproducerende lossepladser. På baggrund af konceptet foretages der en systematisk gennemgang og analyse af hændelsesforløbet, hvor der foretages en vurdering af hver enkelt hændelse og de parametre, der kan stoppe hændelsesforløbet, inden ulykken sker. Der er i rapporten givet forslag til point for de enkelte årsager/forudsætninger.

De barrierer, der kan forhindre eller begrænse hændelsesforløbet, er gennemgået, og der er givet forslag til tildeling af barrierepoint. Barrierer kan være fysiske foranstaltninger som f.eks. etablering af afværgeforanstaltninger, men det kan også

være begrænsning af gasindtrængen i bygninger, begrænsning af gaskoncentration i bygningen eller en kombination af de fysiske og ikke-fysiske foranstaltninger.

Slutteligt foretages der en vurdering af den risiko, hændelsesforløbet udgør. Dette kan ideelt gøres på baggrund af en vurdering af omfanget af mulige konsekvenser af en given hændelse. Det anbefales, at der anvendes konsekvensklasser ved vurdering af sikkerhedsniveauet for en given losseplads. De anbefalede krav til sikkerhed skal være opfyldt for hver bygning, der vurderes i den givne sag. Hvis bygningen anvendes til meget følsomme formål kan der stilles skærpede krav til sikkerhedsforanstaltningerne.

I bilag 3 er der givet en uddybende beskrivelse af barrierediagrammetoden samt pointgivning og vurdering af sikkerhedsniveau. Der er foretaget en verificering af konceptets anvendelighed via udførligt beskrevne eksempler på anvendelse af barrierediagrammetoden på et antal lossepladser.

Undersøgelsesmetoder

For at kunne foretage den risikovurdering, der er givet forslag til i nærværende koncept, er det nødvendigt at indhente oplysninger, der gør, at det er muligt at vurdere, om gassen udgør en risiko for mennesker eller miljøet.

I lighed med andre undersøgelser inden for jord- og grundvandsforurening opdeles undersøgelsesaktiviteterne for lossepladsgas i 3 faser. Der skal indhentes oplysninger til brug for vurdering af gasproduktionen og gastransporten ud af lossepladsen, og dette sikres via data om deponeringsforhold, geologi og arealanvendelse af lossepladsen samt området umiddelbart omkring denne. Ved en indledende undersøgelse undersøges det, om der sker en dannelse af lossepladsgas og om der sker gasmigration ud af pladsen.

Ved de supplerende undersøgelser foretages der de uddybende undersøgelser, der er nødvendige for at foretage en vurdering af gasmigrationen og om der sker gasindtrængning i bygninger på/ved lossepladsen. Jo bedre datagrundlag der foreligger, jo bedre bliver risikovurderingen. Der er givet en detaljeret beskrivelse af de enkelte delelementer, der indgår i en gasundersøgelse i rapportens bilag 2.

Konklusion

Sammenfattende kan det konkluderes, at der er blevet udarbejdet et koncept for risikovurdering af lossepladsgas i relation til både eksisterende og nedlagte lossepladser. Konceptet gør det muligt for myndighederne og andre at foretage risikovurdering af lossepladsgas på et ensartet grundlag og dermed også mulighed for en målrettet indsats, hvor de største problemer er konstateret. På grund af den manglende viden om lossepladsgassens spredning og indtrængen i bygninger er der nogle usikkerheder i konceptet.

Summary and conclusions

During the last ten years in Denmark focus has been put on the risk landfill gas constitutes to houses and other man made constructions situated on, or nearby, landfills.

Experiences have shown that it is very difficult to make a qualified risk assessment concerning gas explosion due to leakage of landfill gas to the surroundings. In Denmark risk assessments is an important and highly integrated part of dealing with soil and ground water contamination. A procedure for risk assessment has been developed for heavy metals, oil, chlorinated solvents etc. The risk related to the traditional soil and groundwater contamination is frequently caused due to long-term exposure. Therefore, risk assessment is often based on average conditions. The risk related to landfill gas is acute and, therefore the risk has to be estimated from worst-case situations and not average conditions.

Risk assessment concerning landfill gas differs from risk assessments made in relation to soil and ground water contamination. Gas migration and gas escape from the ground into houses is governed by mechanisms not yet known in detail. Therefore, it is very difficult to give a description of what can be considered as worst-case.

Among authorities and consulting engineers there has been a need and a desire for a concept for risk assessment in relation to landfill gas. Therefore, in 1995 the Danish Environmental Protection Agency (Danish EPA) decided to develop a concept for risk assessment of landfill gas. Preliminary studies were made and on this background the Danish EPA under "Teknologiprogrammet" (The Technology Program) started the development of a concept for risk assessment of landfill gas. Primarily the purpose is to develop a tool for risk assessment in relation to gas explosions in buildings, houses nearby, or at closed down landfills. This project was started in June 1999 and completed with this report.

Data collection

In the beginning of the study, information was collected concerning Danish and foreign landfill gas explosions and experience of gas migration from landfills in Denmark. All Danish counties including the capital of Copenhagen were asked for information in relation to experiences and strategies with landfill gas and furthermore about accidents as a consequence of landfill gas. The data collection showed that there is only information about a few accidents caused by landfill gas explosions, and that information about each accident is limited.

Information from 70 international corporate business partners and environmental authorities showed that accidents still happen, especially in connection with current on going landfills. With respect to the amount of information on the accidents, the data showed the same limitations as in Denmark.

Based on the collected information, the accidents are divided into major and minor accidents. Major accidents include accidents such as explosions where people are permanently injured or, where there is significant material damage. Minor accidents normally take place in connection with maintenance for examples of landfill installations. Minor accidents are those at which people are not

permanently injured. The collected data have not clarified the causes for the accidents.

The data collected showed that there is relatively little experience with risk assessments in relation to landfill gas-induced accidents. Information has not been received either from national or international corporate business partners and environmental authorities about concepts for risk assessments.

Basic knowledge concerning landfill gas

In the available literature the knowledge about production and migration of landfill gas is dispersed. Therefore, we have summarised the basic knowledge relevant to risk assessment. This report gives a basic introduction to factors of importance to risk assessment with respect to landfill gas. In appendix 1 a detailed description of the different factors is given. The physical-chemical characteristics of landfill gas and conditions concerning gas production and gas migration are described.

We have not come across information in the available literature concerning mechanisms governing the escape of landfill gas into houses. Migration of radon into houses has been fully investigated in connection with radon research in Denmark. We have used the results from this research in our project to evaluate the escape of landfill gas into houses.

Concept for risk assessment

As mentioned earlier, it is not possible to employ the risk assessment methods normally used for soil and ground water contamination for landfill gas. The fundamental idea for this project, therefore, has been to use a barrier diagram method as approach for the risk assessment. Instead of employing the concept for risk assessment normally used in the chemical industry, off-shore and larger traffic installation, a barrier diagram method has been used. It visualises in a well-arranged way even very complicated risk assessments.

It turns out that there are several identical factors that cause a gas explosion when going through the conditions that influence gas production, gas migration and gas escape from the ground. This is all described in the concept of risk assessment where you systematically go through and analyse the sequence of events, evaluating each event and those parameters (barriers) which can stop the event before the accident (gas explosion) happens.

Barriers able to reduce, or prevent, the sequences of events are described, and for each barrier points are suggested. Barriers can be physical arrangements for example remedial actions, but can also be reduction of gas escape from the ground into the houses; reduction of gas concentration in the house, or a combination of the two types.

Finally, the risk the event causes, has to be evaluated. It is recommended to use classes of consequences in the evaluation of the safety level for a specific landfill. The recommended requirement for the safety level has to be met for each building/house assessed.

The barrier diagram method and the point score system has been given, along with the safety level is describes thoroughly in appendix 3. The method has been verified, by applying it to a number of landfills.

Investigations

In order to go through the risk assessment, it is necessary to collect the appropriate information to ensure that it is possible to evaluate whether or not the landfill gas poses a risk to humans or the environment.

Like for other soil and ground water investigations, the investigation of a landfill is split into 3 phases. In the first phase information to be used in the evaluation of the gas production and gas transport from the landfill has to be collected. In the second phase, a preliminary investigation at the site has to be conducted to find out whether or not gas production and gas migration are taking place.

Finally, the necessary supplementary investigations are carried out to evaluate the gas migration and whether or not gas escapes from the ground to the houses/buildings on, or nearby, the landfill. A detailed description of each element of the investigation is given in appendix 2.

Conclusions

A concept for risk assessment of landfill gas in relation to both existing and closed down landfills has been designed. The concept makes it possible for the authorities to conduct landfill gas risk assessments on a uniform basis and thereby to function as a tool for selecting where to aim efforts for investigations and remediation.

1 Indledning

Der findes i Danmark ca. 2.000 nedlagte fyld- og lossepladser. På en stor del af disse pladser vil der produceres lossepladsgas som følge af den mikrobielle nedbrydning, der foregår. Lossepladsgassens hovedkomponenter er metan, kuldioxid og i visse tilfælde kvælstof. På grund af gassens indhold af metan udgør gassen under visse kritiske omstændigheder en eksplosionsrisiko, f.eks. ved indtrængning i bygninger, der ligger tæt på det gasproducerende fyld. Lossepladsgas ofte høje indhold af kuldioxid, og lave indhold af ilt, bevirker at gassen ligeledes under visse kritiske forhold kan udgøre en sundhedsmæssig risiko.

Siden gaseksplosionsulykken i Skellingsted i 1991 har de danske amter udført undersøgelser og risikovurderinger for lossepladsgas på en række lossepladser. På en del af de undersøgte lokaliteter er der udført afværgeprojekter med henblik på at afhjælpe eller imødegå indtrængningen af lossepladsgas i nærliggende bygninger. Hovedparten af foranstaltningerne er udført af amterne, men enkelte er udført af private bygherrer i forbindelse med nybyggeri eller ombygninger.

De gennemførte undersøgelser og risikovurderinger er foretaget på meget forskelligt grundlag, afhængigt af såvel det opdragsgivende amt, som det udførende rådgivende ingeniørfirma. Dette giver stor variation i vurderingen af risikoen fra lokalitet til lokalitet, hvilket bl.a. besværliggør prioriteringen af på hvilke lokaliteter, der skal iværksættes afværgeforanstaltninger.

Den store variation i vurderingerne skyldes bl.a., at undersøgelse og risikovurdering af lossepladsgas adskiller sig væsentligt fra undersøgelser og vurderinger af traditionelle jord- og grundvandsforureninger som f.eks. forureninger med tungmetaller og VOC'er. Forskellene skyldes både forhold omkring produktionen af lossepladsgas, og de risici som gassen udgør.

Tolkning af gasundersøgelser

I modsætning til traditionelle jord- og grundvandsforureninger vil gaskoncentrationerne i det samme målepunkt kunne variere meget over forholdsvis kort tid, og specielt i lossepladser, hvor der sker en svag/langsom gasproduktion, vil gaskoncentrationerne have stor geografisk variation. Dette skyldes, at lossepladsgas er et produkt af den mikrobielle aktivitet i lossepladsfylden. Produktionen af lossepladsgas er således både afhængig af, hvad der er deponeret og af de fysiske, kemiske og biologiske processer i fylden.

Risikovurdering

Risikovurderingen af traditionelle jord- og grundvandsforureninger foretages normalt ud fra en betragtning om, at der sker en længerevarende eksponering af mennesker og miljø. Dette betyder, at risikovurderingen kan foretages ud fra en vurdering af gennemsnitseksposeringen. Ved risikovurderingen af lossepladsgas er det nødvendigt at tage udgangspunkt i en akut risiko, hvilket betyder, at risikovurderingen skal foretages ud fra en vurdering af "worst case". Vurderingen af "worst case" scenariet foretages ud fra ikke-stationære forhold, hvilket ofte bevirker, at vurderingen foretages ud fra en række konservative skøn, som formentlig medfører, at risikoen i mange tilfælde bliver overvurderet.

Ensartede retningslinier

På grund af usikkerhederne omkring undersøgelse og risikovurdering af lossepladsgas, er der et udbredt ønske fra både myndigheder og rådgivende ingeniører om at få ensartede retningslinier om undersøgelser og risikovurdering af lossepladsgas. I et forprojekt udført for Miljøstyrelsen i 1995 foreslås det, at risikovurderingen kan baseres på en kombination af de traditionelle risikovurderinger, der bl.a. kendes fra kemisk industri og transportsektoren, og den viden der er opbygget omkring lossepladsgassens dannelse og spredning samt viden om gassens indtrængning i bygninger.

1.1 Formål

Formålet med nærværende projekt har således været at udarbejde et koncept for risikovurdering af eksplosions- og sundhedsfare i huse, som ligger på eller nær gasproducerende lossepladser. Konceptet skal anvendes af amterne i deres arbejde med nedlagte lossepladser, hvorfor det både skal kunne anvendes over for eksisterende byggeri samt overfor påtænkt nybyggeri. Projektet har ligeledes haft til formål at udarbejde retningslinier for hvilke undersøgelser, der er nødvendige som grundlag for risikovurderingen.

Den opstillede metode til risikovurdering af lossepladser er udarbejdet, så den så vidt muligt dækker alle de forhold, som kan influere på gasrisikoen fra lossepladser.

Fysiske og kemiske forhold vedrørende lossepladsgas, gasproduktion, gasmigration og gasindtrængen i bygninger er beskrevet. På baggrund heraf er der udarbejdet et pointsystem til vurdering af risikoen for ulykke, der skyldes gas fra lossepladser. Pointsystemet er baseret på vurderinger af danske forhold, både med hensyn til lossepladsteknologi, geologi og bygningsteknik. Pointsystemet er dog behæftet med en vis usikkerhed, idet der i litteraturen kun er beskrevet et meget begrænset antal undersøgelser, hvoraf de fleste beskrivelser ikke indeholder ret mange af de oplysninger, der er nødvendige for at foretage en risikovurdering. Tildelingen af point kan derfor være behæftet med en usikkerhed, som vurderes at være i størrelsesordenen 1-2 point. Arbejdsgruppen har dog bestræbt sig på ikke at være optimistiske ved vurdering af de enkelte parametres indflydelse på sikkerheden.

1.2 Rapportens opbygning

Rapporten består af en hoveddel samt en bilagsdel.

Hoveddel

I nærværende kapitel 1 er baggrunden givet for, hvorfor projektet vedrørende opstilling af koncept for både undersøgelser og risikovurderinger er blevet igangsat.

I rapportens kapitel 2 er der givet en grundlæggende introduktion til de forhold og faktorer, der vil indgå ved risikovurdering af lossepladsgas.

I rapportens kapitel 3 er der beskrevet et koncept for risikovurdering på gasproducerende lossepladser baseret på barrierediagrammetoden. Det er beskrevet, hvordan, der med udgangspunkt i generelle barrierediagrammer, kan foretages en risikovurdering af en lokalitet på en gasproducerende losseplads.

Der er i kapitel 4 foretaget en gennemgang af de undersøgelser, det som minimum er nødvendige at gennemføre på en losseplads for at kunne foretage en risikovurdering. Kapitlet er udarbejdet på baggrund af bilag 2, Undersøgellesstrategi, hvor der gives en detaljeret beskrivelse af undersøgelsesmetodikker og undersøgelsesomfang.

I kapitel 5 er angivet referencer anvendt i rapporten.

Bilagsdelen

I rapportens bilag 1, *Lossepladsgas*, er givet en beskrivelse af lossepladsgassens fysisk-kemiske karakteristika (bilag 1 afsnit 1). Der er tillige givet en beskrivelse af gasproduktionen i en losseplads, fra affaldet deponeres til nedbrydningsprocesserne er tilendebragt (bilag 1 afsnit 2). I bilag 1 afsnit 3 er beskrevet forholdene vedrørende gasmigration, herunder migrationsmekanismer samt de forhold, der influerer herpå. I bilag 1 afsnit 4 er beskrevet de forhold, der har betydning for gasindtrængen i bygninger samt foretaget beregninger af koncentrationer af lossepladsgas i bygninger.

I rapportens bilag 2, *Undersøgellesstrategi*, er der givet forslag til, hvorledes et koncept for undersøgelser på en potentielt gasproducerende losseplads hensigtsmæssigt kan gennemføres i forbindelse med indledende undersøgelser samt supplerende undersøgelser. Det er tillige beskrevet, hvorledes en bygningsmæssig gennemgang af bygninger på/ved gasproducerende lossepladser kan foretages.

I rapportens bilag 3, *Barrierediagrammer*, er der i afsnit 1 givet en uddybende beskrivelse af barrierediagrammetoden, opbygning af barrierediagrammer, forhold vedrørende pointgivning samt vurdering af sikkerhedsniveauer. I Bilag 3 afsnit 2 er vist nogle generelle barrierediagrammer, der kan anvendes ved udførelse af risikovurderinger. I Bilag 3, afsnit 3 er givet eksempler på anvendelse af barrierediagrammer for lossepladser.

I rapportens bilag 4, *Resume af forprojekt*, er der foretaget en gennemgang af forprojektet vedrørende gasproducerende lossepladser, som Miljøstyrelsen har ladet udarbejde /1/.

I rapportens bilag 5, *Danske og udenlandske erfaringer*, er indsamlet danske og udenlandske erfaringer vedrørende eksplosions/brandulykker i forbindelse med lossepladsgas. Der er for enkelte ulykker foretaget en detaljeret beskrivelse af omstændighederne ved ulykkerne, herunder bl.a. oplysninger om geologi på/ved lossepladserne, bygningsmæssige og meteorologiske forhold. Endelig er de opståede skader beskrevet i relation til de skadestyper, der arbejdes med i risikovurderingen. Der er tillige givet en oversigt over de personer/firmaer/instanser, der er kontaktet i forbindelse med indhentning af de oplysninger, der bl.a. har dannet grundlag for gennemførelsen af projektet. Slutteligt er en oversigt over de steder/adresser på Internettet, hvor der er søgt indhentet oplysninger til brug ved projektgennemførelsen.

1.3 Affaldsdeponeringsanlæg

Lossepladsgas vil dannes, når der er sket deponering af en større mængde bionedbrydeligt affald. Lossepladsgas vil derfor kunne forekomme på alle typer deponeringsanlæg, hvor der er deponeret bionedbrydeligt affald.

I almindelig dansk tale er et affaldsdeponeringsanlæg og en losseplads synonyme. Ifølge nudanske ordbøger er en losseplads en plads, hvor der lægges affald. I

almindelig dansk tale er en losseplads således et sted, hvor man placerer de ting, som man ønsker at smide væk.

På juridisk og teknisk dansk er en losseplads dog kun én blandt mange typer af affaldsdeponeringsanlæg. Deponeringsanlæg kan opdeles i følgende hovedtyper:

- Ukontrolleret losseplads. Losseplads, der er anlagt uden membraner og perkolatopsamlingssystem. Lossepladserne er typisk anlagt før 1973. Ordet losseplads anvendes oftest om pladser, som modtager mange forskellige affaldstyper som f.eks. dagrenovation, industriaffald, slagger og slam.
- Kontrollerede losseplads. Lossepladser, der er anlagt med bundmembraner og/eller perkolatopsamlingssystemer. Lossepladserne er typisk anlagt i slutningen af 1960'erne eller senere. Op gennem 1980'erne bliver lossepladsernes membraner og drænsystemer bedre, flere lossepladser anlægges med dobbelt bundmembran, og lossepladserne får side og topmembran. I midten af 1980'erne kommer den første losseplads i Danmark med gasindvindingsanlæg.
- Fyldpladser. Pladser som kun modtager forholdsvis inerte affaldstyper dvs. affaldstyper, som kun har et ringe forureningspotentiale, f.eks. lettere forurennet jord. Fyldpladserne kan dog sagtens have modtaget bionedbrydeligt affald i form af f.eks. haveaffald, kirkegårdsaffald (pyntegrønt, blomster m.v.). I lighed med lossepladserne kan fyldpladserne opdeles i kontrollerede fyldpladser, som har f.eks. membraner og perkolatopsamlingssystemer, og i ukontrollerede pladser.
- Specialdepoter, er pladser som kun modtager en speciel type affald, f.eks. miljøfarligt affald, slagger eller asbest. Specialdepoterne kan enten være selvstændige anlæg eller være integreret i et større affaldsdeponeringsanlæg. Specialdepoterne er hovedsageligt anlagt efter 1980.
- Affaldsdeponi. I midten af 1990'erne forsvandt betegnelserne losseplads og fyldplads og blev erstattet af fællesbetegnelsen "affaldsdeponi".

Da formålet med nærværende rapport hovedsageligt har været, at udarbejde et risikovurderingskoncept for vurdering af lossepladsgas fra gamle ukontrollerede lossepladser, er det valgt at anvende ordene losseplads og lossepladsgas, i stedet for affaldsdeponi og deponigas. Ordet losseplads anvendes i nærværende rapport således i ordets brede forstand om alle typer af affaldsdeponier.

Ved vurderingen af gasproduktion er det vigtigt at forstå, at lossepladsernes udformning og affaldets sammensætning har ændret sig meget gennem tiden, og at der kun er meget få fællestræk mellem et moderne affaldsdeponi og en ukontrolleret losseplads fra midten af det 20. århundrede.

Lossepladsernes udvikling

Udviklingen inden for lossepladsteknologi har fulgt en parallel udvikling med resten af samfundet. I den første halvdel af det 20. århundrede var lossepladserne forholdsvis primitive, men op igennem det 20. århundrede er pladserne blevet mere og mere regulerede og effektiviserede.

De tidlige lossepladser var hovedsageligt små pladser, der var anlagt i lavninger, moser, grusgrave, mergelgrave m.v. Affaldet blev sjældent sorteret, og der blev ikke gjort tiltag for at mindske affaldets volumen i form af kompaktering eller neddeling af affaldet. I mange lossepladser var der dog ofte brande, hvorved

affaldets volumen blev mindsket. I nogle lossepladser blev der af samme årsag ligefrem sat ild til affaldet.

I 1960'erne begyndte man for alvor at kompaktere affaldet, og på nogle lossepladser blev opsat anlæg til neddeling af affaldet, f.eks. Danoanlæg. Der begyndte ligeledes at komme godkendelser af lossepladserne i form af sundhedskommissions godkendelser, og myndighederne begyndte at stille vilkår om, at der f.eks. skulle foretages rottebekæmpelse. I 1960'erne begyndte man derfor at foretage daglig afdækning af affaldet.

I slutningen af 1960'erne blev man mere miljøbevidst, og der begyndte at blive anlagt lossepladser med perkolatopsamlingssystemer. I 1973 træder den første miljøbeskyttelseslov i kraft og i 1974 udgiver Miljøstyrelsen den første vejledning om kontrollerede lossepladser. I 1982 udgiver Miljøstyrelsen en ny vejledning for affaldsdeponering /2/, og i 1985 udgav Dakofa et skrift om grundvandskontrol ved kontrollerede lossepladser /3/. Disse to værker har haft afgørende betydning for lossepladsernes udformning og drift i den sidste del af det 20. århundrede, og for hvordan vi i dag opfatter og opdeler de gamle affaldsdeponeringsanlæg.

I 1997 udgav Miljøstyrelsen den tredje vejledning i affaldsdeponering /4/. Med denne vejledning forsvandt betegnelserne losseplads og fyldplads, for at blive erstattet af fællesbetegnelsen affaldsdeponi. Inddelingen af affaldet i forskellige typer ændres også, og der arbejdes nu med tre kategorier: kategori I *inert affald*, kategori II *mineralsk affald* og kategori III *blandet affald*. I Danmark har det igennem de seneste ca. 10 år været en politisk målsætning, at energien i det brandbare affald skulle udnyttes i affaldsforbrændingsanlæg. Dette har betydet, at den bionedbrydelige del af affalds mængden i affaldsdeponierne er blevet stadig mindre. Og med Miljøstyrelsens vejledning i 1997 blev denne tendens styrket.

I 1998 udgav Teknisk Forlag en lærebog i affaldsteknologi /5/. Denne bog, der er den første bog på dansk om moderne affaldsteknologi, beskriver detaljeret de teknologiske aspekter omkring opbygning og drift af affaldsdeponier. Bogen kan anbefales til de, der ønsker et mere indgående teknologisk kendskab til moderne affaldshåndtering.

2 Ulykker forårsaget af lossepladsgas

2.1 Introduktion

I dette kapitel er givet en grundlæggende introduktion af hvilke faktorer, der er af betydning ved vurderingen af risici i forbindelse med lossepladsgas, og hvorledes disse kan systematiseres, således at man til stadighed bevarer overblikket over den række af komplicerede processer og uheldige omstændigheder, der kan bevirke, at der opstår gasulykker.

I det efterfølgende kapitel vil principperne fra dette kapitel blive konkretiseret, ligesom der vil blive givet forslag til, hvorledes vurderingerne af de enkelte hændelser kan foretages.

I forbindelse med udarbejdelse af denne rapport er der forsøgt indhentet oplysninger om hvilke ulykker, lossepladsgas har forårsaget både i Danmark og internationalt. Formålet var dels at få oplysninger om hvilke typer af ulykker, lossepladsgas kan/har forårsaget, og hvilke omstændigheder, der ledte frem til ulykkerne. Indsamlingen og bearbejdningen af data er beskrevet i bilag 5. Dataindsamlingen viste, at det er yderst sjældent, at detaljerede oplysninger om en gasulykken er tilgængelige, og at der stort set aldrig er foretaget fyldestgørende undersøgelser af hvilke forhold, der har ledt frem til ulykken. Oplysninger om tidligere gasulykker er derfor ikke anvendelige som basis for udarbejdelse af et risikovurderingskoncept. Et koncept til risikovurdering af lossepladsgas må derfor opbygges på baggrund af teoretiske modeller, som i et vist omfang kan verificeres ved at sammenholde dem med oplysninger fra tidligere gasulykker.

2.2 Risici ved lossepladsgas

Lossepladsgas er samlebetegnelsen for den komplekse sammensætning af gasser, der dannes under nedbrydningen af det bionedbrydelige materiale i fyld- og lossepladser.

Hovedkomponenterne i lossepladsgas udgøres normalt af metan (CH_4) og kuldioxid (CO_2), og når ordet lossepladsgas anvendes i daglig tale, er det oftest metanen, der bliver refereret til. Lossepladsgas kan også indeholde høje koncentrationer af brint (H_2), og specielt i starten og slutningen af en affaldscelles livscyklus vil lossepladsgassen kunne indeholde høje koncentrationer af kvælstof (N_2), som stammer fra atmosfærisk luft, der er trængt ned i fylden. Lossepladsgassens hovedkomponenter er alle lugtfrie og farveløse gasser, som ikke umiddelbart kan spores af de menneskelige sanser. Lossepladsgas har dog oftest en meget tydelig lugt, som skyldes at gassen indholder en række sporstoffer. Sporstofferne vil dannes både på grund af mikrobiologiske og fysisk-kemiske processer i affaldet og som følge af afdampning fra eventuelt kemikalieaffald.

Formålet med denne rapport er, som nævnt i indledningen, at give et koncept for risikovurdering i forhold til lossepladsens hovedkomponenter metan og kuldioxid, medens et koncept for risikovurdering i forhold til sporstofferne i gassen ikke er medtaget. Mht. sidstnævnte problematik henvises til Miljøstyrelsens vejledninger om oprydning på forurenede lokaliteter /10/.

I lossepladser, hvor der er en kraftig gasproduktion, vil metan og kuldioxid oftest udgøre mere end 95 % af gasvoluminet med metankoncentrationer på mellem 50 og 65 vol. % og kuldioxidkoncentrationer på mellem 35 og 50 vol. %.

Risiciene i forbindelse med lossepladsgas kan opdeles i en brand/eksplosionsrisiko, der hovedsageligt skyldes gassens indhold af metan, og en kvælningsrisiko, der dels skyldes gassens høje indhold af kuldioxid, dels gassens lave indhold af ilt.

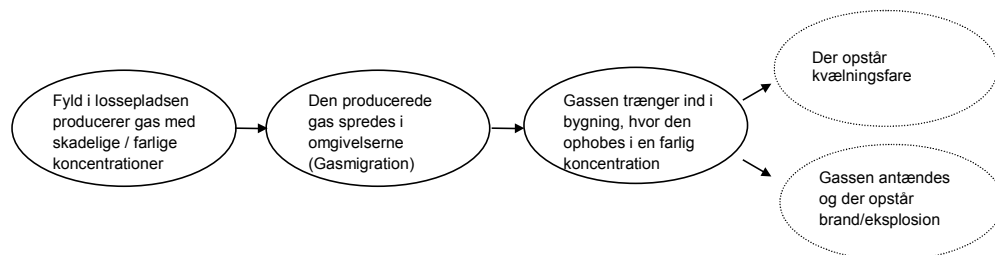
Metan er brandbart i gasblandinger, hvor metanen udgør mellem 5 og 15 vol. %, og hvor der samtidigt er tilstrækkelige høje iltkoncentrationer, det vil sige iltkoncentrationen større end 13 vol.%. Tilstedeværelsen af kuldioxid sænker specielt den øvre grænse for antændelsesintervallet. Antændelsen af brandbare gasblandinger vil i det åbne rum bevirke en hurtig forbrænding af gasblandingen, men i et lukket rum vil branden kunne udvikle sig til en eksplosionsagtig brand på grund af den varmeudvikling og dermed trykstigning, der sker ved branden.

Kuldioxid er en kvælende gas, der i høje koncentrationer kan være livstruende og i lavere koncentrationer kan give utilpashed og f.eks. synsforstyrrelser. Ved indånding af kuldioxid vil virkningen på mennesker være en jævn overgang mellem en simpel tilpasningsproces til toksiske reaktioner. Ved kuldioxidkoncentrationer over 1 vol.% kan der opstå bevidstløshed, og koncentrationer over 9 vol. % kan være dødelige. Lossepladsgas vil i sig selv kunne virke livstruende pga. kvælning forårsaget af lav iltkoncentration, også efter opblanding med atmosfærisk luft. Ved iltkoncentrationer under 18 vol. % kan der opstå bevidstløshed, og ved længere tids eksponering kan iltkoncentrationer under 18 vol. % være livstruende. I blandinger mellem den iltfrie lossepladsgas og atmosfærisk luft hvor lossepladsgassen udgør mere end 15 % af gasvoluminet vil den resulterende iltkoncentration blive lavere end 18 vol. %, og sådanne gasblandinger vil derfor være livstruende på grund af det lave iltindhold i gasblandingen.

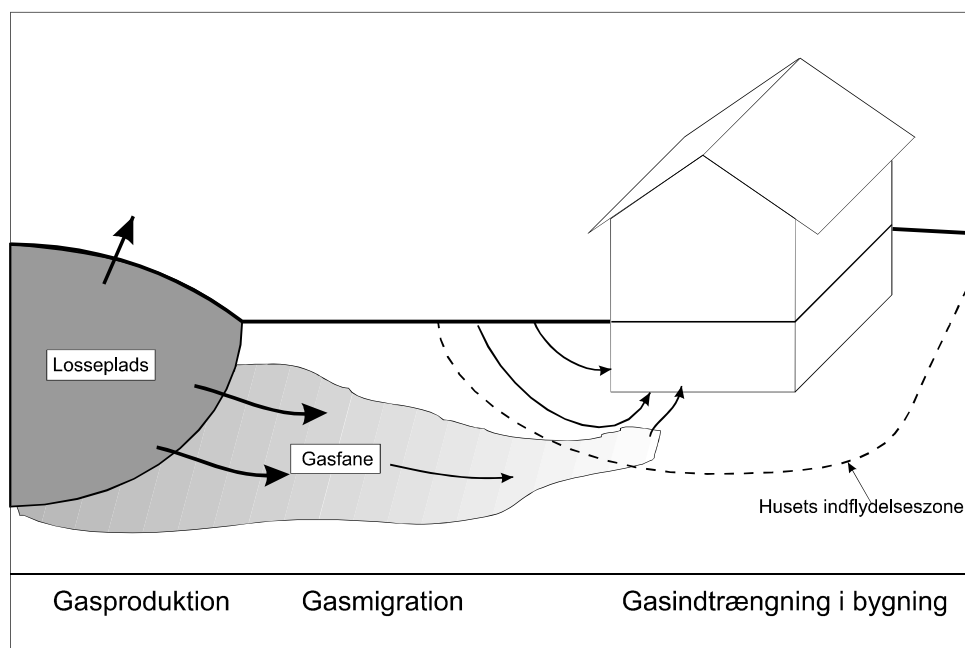
I Bilag 1, afsnit 2 er givet en mere detaljeret beskrivelse af de forhold, der bevirker, at der opstår brandbare gasblandinger af lossepladsgas. I bilag 1 gives desuden en generel beskrivelse af de fysiske og kemiske egenskaber for lossepladsgassen og dens hovedkomponenter.

2.3 Ulykke på eller ved losseplads

Ved risikovurderingen af ulykker, som skyldes lossepladsgas, tages oftest udgangspunkt i de brand-/eksplosions- eller kvælningsrisici, som lossepladsen kan bevirke på grund af dens høje indhold af metan og kuldioxid. For at der skal opstå brand/eksplosions eller kvælningsfarer som følge af lossepladsgas, skal en række faktorer, som tilsammen udgør et hændelsesforløb, være opfyldt:



I figur 2.1 er disse forhold illustreret.



Figur 2.2 Forhold der bevirker, at der kan opstå en brand/eksplosions- eller kvælningsfare i en bygning, der ligger op til en losseplads

For at foretage en risikovurdering af en aktuel lokalitet ved en losseplads skal de enkelte faktorer i hændelsesforløbet vurderes. En ulykke er først indtruffet, når mindst de tre første faktorer i hændelsesforløbet er opfyldt.

Produktionen og spredningen af lossepladsgas i miljøet sker som følge af en række komplicerede processer. Den overordnede sammenhæng, der styrer disse processer, er kendt, men der er stadig en lang række uafklarede forhold, der bevirker, at det ikke er muligt at give en detailbeskrivelse af såvel gasproduktionen som gasspredningen i miljøet. I Bilag 1 afsnit 2 er givet en beskrivelse af de forhold, der har betydning for produktionen af lossepladsgas, både kvantitativt og kvalitativt, og i bilag 1 afsnit 3 og 4 gives en beskrivelse af de forhold, der styrer gasspredningen i den umættede zone i jorden og gasindtrængningen i bygninger. I de følgende afsnit gives et resume af oplysningerne i disse bilag.

2.3.1 Gasproduktion

Produktionen af lossepladsgas bevirker, at der gennem hele lossepladsens aktive periode vil ske en større eller mindre gasemission fra lossepladsen. Gasemissionerne er således resultatet af de biologiske-, kemiske- og fysiske processer, der foregår i lossepladsen, og dermed af det miljø, der hersker i lossepladsen. Sammensætningen og omfanget af gasemissionerne vil afhænge af en række faktorer som bl.a. affaldets sammensætning og alder, lossepladsens fysiske udformning samt måden lossepladsen er drevet på, både under og efter affaldsdeponeringen har fundet sted.

Variationer i gasproduktionen sker oftest forholdsvis langsomt. Generelt vil gasproduktionen være størst i nyere lossepladser, som fortsat er i drift, eller hvor affaldsdeponeringen er afsluttet for nyligt. Modelberegninger af gasproduktionen i lossepladser viser, at gasproduktionen er størst i de første år efter, deponeringen er ophørt. Herefter vil produktionen langsomt aftage. Erfaringer fra undersøgelser af

lossepladsgas viser, at der stadig kan ske gasproduktion i lossepladser, hvor fylden er mere end 50 år gammel.

Modelberegninger af gasproduktionen vil oftest være meget usikre. Modellerne vil derfor normalt kun kunne anvendes i forbindelse med forholdsvis unge lossepladser. For de gamle lossepladser, bl.a. dem, der er omfattet af lov om forurenet jord, vil modelberegninger af gasproduktionen sjældent kunne anvendes, dels fordi de generelle beregningerne er meget usikre, dels fordi der i de gamle lossepladser ofte er en stor variation i gasproduktionen, som kun meget vanskeligt lader sig modellere. I de ældre lossepladser vil der således oftest kunne ses en stor rumlig variation i gasproduktionen, ligesom der også kan være en betydelig tidsmæssig variation f.eks. i form af årstidsvariationer og/eller som følge af varierende meteorologiske forhold.

2.3.2 Gasmigration

Da lossepladsgas er et restprodukt ved nedbrydningen af bionedbrydeligt affald, er lossepladsgas en væsentlig mere dynamisk forurening end traditionelle jord- og grundvandsforureninger, og spredning og koncentrationsniveauer kan ændres radikalt i løbet af meget få timer. Dette sammenholdt med at lossepladsgas oftest kun udgør en risiko i særlige situationer, hvor der sker en kraftig udsivning af gas, gør at risikovurderingen af lossepladsgas er meget vanskelig.

Vurderinger af gasmigrationen i den umættede zone er ligeledes kompleks. Vurderingen vil oftest med fordel kunne opdeles i to: Gasmigration inde i lossepladsen og gasmigration uden for lossepladsen.

2.3.2.1 Gasmigration i lossepladsen

Gasbevægelser inde i lossepladsen vil afhænge af en række faktorer, hvoraf de vigtigste er deponeringsmetoden på lossepladsen og affaldets sammensætning. En deponeringsmetode, hvor affaldet er lagt i tynde lag samt kompakteret, og hvor der er foretaget daglig afdækning, vil fremme den horisontale gasstrømning. Er affaldet derimod deponeret fra en læssefront, vil dette kunne fremme den vertikale gasstrømning. Inhomogeniteten i affaldets sammensætning, i slutafdækning m.v. vil bevirke, at gasudsivningen fra lossepladsen vil have en stor rumlig variation.

De meteorologiske faktorer har også indflydelse på gasudsivningen. Ændringer i atmosfæretrykket kan således øge eller mindske den mængde gas, der siver ud af lossepladsen. Et pludseligt fald i atmosfæretrykket vil have en tendens til at trække gassen ud af jorden, hvorved gasudsivningen øges. Ved en pludseligt stigning i atmosfæretrykket mindskes gasudsivningen, og afhængigt af gasproduktionen i lossepladsen vil atmosfærisk luft kunne trænge ned i de øvre lag af lossepladsen. Pludselige bevægelser i perkolatniveauet vil ligeledes kunne øge eller mindske gasudsivningen. I kystnære lossepladser vil perkolatniveauet kunne svinge i takt med tidevandet, og derved give en pumpeeffekt, der påvirker gasudsivningens størrelse.

Set i et overordnet perspektiv vil den totale gasmigration, der sker ud af en losseplads, være stort set den samme som den gasproduktion, der foregår, idet en del af den producerede metan vil blive omsat ved metanoxidation i de øvre jordlag. Variationerne i gasudsivningen er dog vanskelig at forudsige på grund af de store geografiske og tidsmæssige variationer, og fordi effekten af de forskellige faktorer vil være individuelle for de enkelte lossepladser, eller endog for de enkelte dele af lossepladsen.

2.3.2.2 Gasmigration udenfor lossepladsen

Gasvandringen i den umættede zone uden for lossepladsen drives dels af trykforskellen mellem lossepladsen og den omkringliggende jord, dels af trykændringer i atmosfæren. Der er en række faktorer, der har betydning for gasvandringen i jorden. Den vigtigste er jordens gaspermeabilitet, der dels er afhængig af jordens samlede permeabilitet, dels af fugtigheden i jorden. Selv i forholdsvis homogene jorde vil den geografiske variation i gasvandringen kunne variere flere størrelsesordner på grund af variationer i jordens permeabilitet og fugtighed.

Tidsmæssigt vil der også være variationer i gasvandringen i jordlagene omkring lossepladsen. De tidsmæssige variationer sker på flere skalaer, dels er der variationer som følge af årstiden, men der er også hurtigere variationer som følge af f.eks. pludselige ændringer i atmosfæretrykket og/eller nedbør, hvor gasfluxen kan ændres drastisk i løbet af ganske få timer.

Der foreligger endnu kun få undersøgelser, der detaljeret belyser gasmigrationen og ændringerne i disse. En egentlig kvantificering af gasmigrationen ved en given losseplads er derfor behæftet med betydelige usikkerheder.

2.3.3 Gasindtrængning i bygninger

I hovedparten af alle danske bygninger vil der ske indtrængning af jordgasser til bygningen. Indtrængningen vil enten ske som diffusion gennem gulvkonstruktioner og f.eks. kældervægge eller som trykdriven indtrængning (konvektion). Ved vurderingen af indtrængningen af lossepladsgas vil hovedvægten blive lagt på trykdriven gasindtrængning, da denne vurderes at være den væsentligste.

Fra de undersøgelser, der er foretaget af lossepladsgas, er der kun meget få erfaringer med gasindtrængning i bygninger. Mange af betragtningerne i denne rapport bygger derfor på erfaringer fra radon. Dette skyldes, at der er foretaget radonmålinger i et relativt stort antal huse, og fordi de mekanismer, der styrer radons og lossepladsgassens indtrængning i bygninger, i vid udstrækning er de samme. Radon er en naturligt forekommende radioaktiv gas, som findes i høje koncentrationer under de fleste danske huse. Typisk er radonkoncentrationen i poreluften 10.000 gange højere end koncentrationen i udeluft. Radon er således en god sporgas for identifikation af jordluftindtrængning.

2.3.3.1 Drivende kræfter

Indendørs-udendørs temperaturforskelle, vind og drift af mekaniske ventilationsanlæg frembringer normalt et lille undertryk af størrelsesordenen 1 til 3 pascal (Pa) imellem husets indre og den omgivende atmosfære. Undertrykkets størrelse varierer igennem døgnet (normalt med maksimum tidligt om morgenen) og igennem året (normalt med maksimum om vinteren).

Denne trykforskel giver anledning til, at jordluft suges ind i huset. Typiske værdier for indtrængningsraten til et almindeligt dansk enfamiliehus vurderes at være omkring 0,1 til 1 m³/time. Dette strømningsfelt danner en zone i jorden umiddelbart under og omkring huset (se figur 2.1). Zonen kan kaldes for husets indflydelseszone, idet man som udgangspunkt kan påregne, at enhver gaskomponent (f.eks. lossepladsgas, VOC'er eller radon), som af en eller anden grund kommer ind i denne zone, vil blive ført ind i huset af gasstrømningen.

Indtrængningsraten er proportional med undertrykkets størrelse. Hvis der kommer 1 m³/time ind i huset ved 1 Pa, så vil indtrængningen stige til 3 m³/time ved 3 Pa.

En lang række af de kendte gasulykker, der skyldes indsivende lossepladsgas, er sket i perioder med faldende atmosfærisk tryk. Der foreligger også feltnmålinger, som viser, at der kan komme udgasninger fra jordoverfladen, når trykket falder. Derimod er det mindre godt belyst, hvordan sådanne trykfald påvirker indtrængningen af jordgas til huse. Undersøgelser af radon tyder på, at trykfaldet kun har en ringe betydning for indtrængningen af jordgas til huse. Som beskrevet i de forgående afsnit vil ændringerne i atmosfæretrykket derimod have stor indflydelse på gasmigrationen i jorden, og dermed efterfølgende på gaskoncentrationerne i indflydelseszonen. I perioder med faldende atmosfæretryk kan gaskoncentrationerne i indflydelseszonen stige, og derved vil gaskoncentrationerne i den jordgas, der siver ind i bygningen, også stige.

2.3.3.2 Gaspermeabilitet og kontaktzone

Indtrængningsraten stiger med jordens gaspermeabilitet. Der er stort set proportionalitet mellem jordens gaspermeabilitet og indtrængningen i en bygning. Modelberegninger viser, at hvis der for en given bygning sker en luftindtrængning på omkring $1,6 \text{ m}^3/\text{time}$ ved en gaspermeabilitet på 10^{-10} m^2 i jorden, så vil gasindtrængningen kun være $0,18 \text{ m}^3/\text{time}$ ved en gaspermeabilitet på 10^{-11} m^2 og $0,018 \text{ m}^3/\text{time}$ ved en gaspermeabilitet på 10^{-12} m^2 .

Det kapillarbrydende lag, antallet af revner i betondækket og revnernes størrelse spiller naturligvis en rolle for jordluftindtrængningens størrelse. Revnebredden har specielt betydning ved små revner. Revner bredere end 1 mm er så store, at gasindtrængningen stort set sker uhindret, og gasindtrængningen er stort set den samme, uanset om revnen er 50 eller 1 mm bred. Først når revnen kommer under en brøkdel af en mm, begrænses indtrængningen væsentligt.

Det kapillarbrydende lag spiller en vigtig rolle for indtrængningen: Det skyldes, at jorden ikke er homogen (men f.eks. opsprækket), og at revnerne i betondækket er spredt over gulvarealet. I sådanne tilfælde vil det kapillarbrydende lag tilvejebringe en god kobling mellem særligt hurtige transportveje i dækket og i jorden.

Eksperimentelle undersøgelser og modelberegninger har vist, at hvis man betragter mindre revner eller huller i betondækket (fremfor en enkelt sammenhørende revne langs hængende dæk og ydermur), da vil indtrængningen til et hus uden kapillarbrydende lag stort set være proportional med det samlede lækareal af revner. For et sådant hus vil indtrængningen altså direkte afhænge af antallet og størrelsen af revnerne. For huse med et kapillarbrydende lag vil lækarealet derimod være uden betydning, hvis dækket blot er "punkteret" et enkelt sted. For sædvanlige danske huse med kapillarbrydende lag kan man altså ikke forvente, at indtrængningen af jordluft kan begrænses væsentligt ved at tætte dækket, med mindre man effektivt stopper alle utætheder.

2.3.4 Antændelse af gas

For at der kan opstå en brand/eksplosion i en blanding af lossepladsgas og luft, skal der være en antændelseskilde. Antændelse kan skyldes alt fra åben ild i form af pejse, brug af tændstikker og rygning til mindre åbenlyse antændelseskilder som elinstallationer, oliefyr eller gnistdannelse pga. f.eks. mekanisk friktion. Det kan derfor sjældent helt afvises, at der er mulige antændelseskilder, og i bygninger der f.eks. anvendes til helårsbeboelse, må man som udgangspunkt antage, at der altid vil være antændelseskilder.

2.4 Principper for risikovurdering

2.4.1 Danske- og udenlandske erfaringer

I bilag 5 er foretaget en gennemgang af såvel de danske som internationale erfaringer med lossepladsgas, herunder også erfaringer med risikovurderinger. En rundspørge til de danske amter viser, at der fortsat foretages en meget individuel vurdering af risici i forbindelse med losseplads, som er afhængig af såvel det amt, der får foretaget undersøgelser og risikovurdering som den rådgiver, der foretager risikovurderingen. Enkelte amter har i første halvdel af 1990'erne udviklet et risikostyringsværktøj, hvor hver enkelt losseplads vurderes med hensyn til videre tiltag, f.eks. supplerende undersøgelser, monitoring og afværgeforanstaltninger. I den sidste halvdel af 1990'erne har der kun været en meget lille metodeudvikling indenfor lossepladsgasområdet, og situationen i dag må betegnes som svarende til situationen midt i 1990'erne. Internationalt set sker udviklingen indenfor risikovurderingsværktøjer for lossepladsgas også meget langsomt. I hovedparten af de lande, der er rettet henvendelse til i forbindelse med dette projekt, er der ikke udarbejdet vejledninger for risikovurderingen. I enkelte lande som England og Østrig er der udarbejdet overordnede retningslinier for risikovurderingen. Der foreligger dog ikke noget detaljeret risikovurderingskoncept i lighed med dem, der kendes for traditionelle jord- og grundvandsforureninger, som er angivet i f.eks. Miljøstyrelsens vejledninger nr. 6 og 7, 1998 /10/.

2.4.2 Risikovurderingskoncept

I det foregående afsnit blev de grundlæggende forhold, der har indflydelse på gasproduktion, gasmigrationen og gasindtrængen i bygninger gennemgået. Som det fremgår af afsnittet, er det en lang række sammenfaldende forhold eller hændelser, der bevirker, at der opstår en gaseksplosionsrisiko. Ved udarbejdelse af et risikovurderingskoncept er det derfor nødvendigt at foretage en systematisk gennemgang og analyse af hændelsesforløbet, hvor der foretages en vurdering af hver enkelt hændelse og de parametre, som kan stoppe hændelsesforløbet, inden det udvikler sig til en ulykke.

Risikovurdering er baseret på følgende grundelementer:

- Identifikation af risici
- Beskrivelse af hændelsesforløb
- Identifikation af barrierer, der kan stoppe hændelsesforløbet
- Vurdering af mulige konsekvenser
- Vurdering af risiko.

Identifikation af risici er for lossepladser baseret på en gennemgang af danske og udenlandske ulykker på eller nær ved lossepladser, se bilag 5.

Beskrivelsen af hændelsesforløb og identifikation af barrierer, der kan stoppe hændelsesforløbet, er baseret på en systematisk gennemgang af de enkelte faktorer, som har indvirkning på hændelsesforløbet. Faktorerne er summarisk gennemgået i afsnit 2.3.1 til 2.3.4.

Selve hændelsesforløbet kan opdeles i tre hændelsestyper:

- Årsager (og forudsætninger)
- Hændelser
- Konsekvens.

En årsag er en udgangshændelse, der er uafhængig af de øvrige forhold, og som initierer den række af hændelser, der fører til en konsekvens.

De efterfølgende hændelser er afhængige af udfaldet af de tidligere skete hændelser. Således kan der f.eks. ikke ske gasmigration, hvis der ikke er sket gasproduktion.

Konsekvensen er sluthændelsen, der afslutter hændelsesrækken. Konsekvensen, som er resultatet af hændelsesforløbet, der er illustreret i figur 2.1, kan f.eks. være en brand eller eksplosion i en bygning.

Barrierer er forhold, som kan stoppe hændelsesforløbet, f.eks. afværgeforanstaltninger eller jordbundsforhold, som forhindrer lossepladsgassen i at migrere i en bestemt retning.

De faktorer, som har indflydelse på hændelsesforløbet, er beskrevet i flere detaljer i bilag 1 og systematiseret i kapitel 3. Resultatet er et barrierediagram, som integrerer beskrivelsen af hændelsesforløb herunder barrierer, som kan stoppe hændelsesforløbet, med en vurdering af, om risikoen for den anførte konsekvens, her ulykke med lossepladsgas, er acceptabel.

Nedenfor er oplistet årsager, barrierer og konsekvenser, som systematiseringen af hændelsesforløbet har resulteret i:

Arsager/forudsætninger	Barrierer	Konsekvenser
Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer	Begrænsning af udsivning fra losseplads	Konsekvensklasse 5: Mulighed for dødsfald eller varigt skadede blandt personer uden relation til lossepladsen
Der er skiftende migrationsfremmende forhold	Gasmigration begrænses udenfor losseplads	Konsekvensklasse 4: Mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen
Der er konstante migrationsfremmende forhold	Begrænsning af gasindtrængen	
Bygning/Bygværk med mennesker til stede	Begrænsning af gaskoncentration i bygning/bygværk	Konsekvensklasse 3: Mindre alvorlig personskader
	Begrænsede antændelsesmuligheder	

Ved skiftende migrationsfremmende forhold forstås vejrforhold, f.eks. frost eller voldsomt regnvejr.

Ved konstante migrationsfremmende forhold forstås f.eks. overtryk i lossepladsen.

For så vidt angår detaljer om årsager, barrierer og konsekvenser henvises til kapitel 3.

2.5 Risikovurderingens anvendelighed

Det har været målsætningen, at konceptet skulle kunne anvendes til vurdering af risici for lossepladsgas, herunder specielt risikoen for brande/eksplosioner i bygninger beliggende på eller umiddelbart op til en losseplads. Det har desuden været arbejdsgruppens målsætning, at risikovurderingskonceptet både skulle kunne anvendes i forhold til de gamle, nu lukkede losse- og fyldpladser og i forhold til de idriftværende affaldsdeponier.

Risikovurderingskonceptet er et forsøg på at give såvel myndigheder som de rådgivende ingeniører et værktøj til at foretage en systematisk gennemgang og vurdering af de mulige hændelser og risici, der måtte være i forhold til en konkret losseplads, for på baggrund heraf at foretage en egentlig vurdering af gasrisikoen.

På grund af konceptets systematik, give det mulighed for en egentlig risikostyring, forstået på den måde, at konceptet giver et forbedret grundlag for vurdering af hvilke supplerende undersøgelser, det er nødvendigt at udføre, eller hvor det er mest hensigtsmæssigt at foretage afværgeforanstaltninger, samt hvilken sikkerhedsmæssig effekt de forskellige typer af foranstaltninger giver.

Risikovurderingskonceptet vil tillige kunne anvendes til en prioritering af indsatsen over for gasrisikoen, både i forbindelse med amternes arbejde med lov om forurenet jord, men også i forbindelse med myndighedsgodkendelser af idriftværende affaldsdeponier.

3 Risikovurdering ved anvendelse af barrierediagrammer

3.1 Indledning

I dette kapitel er beskrevet et koncept for risikovurdering af gasproducerende lossepladser baseret på barrierediagrammetoden. Barrierediagrammetoden er oprindeligt udviklet til dokumentation af sikkerhedsforhold på virksomheder, der håndterer farlige stoffer jf. Miljøstyrelsens Miljøprojekt Nr. 112 /11/.

En lokalitet på en gasproducerende losseplads risikovurderes ud fra de generelle barrierediagrammer. De generelle barrierediagrammer er indsat i bilag 3 afsnit 2. I bilag 3 afsnit 3 gives eksempler på risikovurdering af konkrete lokaliteter. Eksemplerne i bilag 3 afsnit 3 er udarbejdet ud fra eksisterende udvalgte lokaliteter, der er anonymiseret og generaliseret idet det ikke er formålet at belyse de enkelte lossepladser, men derimod at illustrere den principielle anvendelse af barrierediagrammerne.

Barrierediagrammernes oprindelige formål var at skabe overblik over komplicerede hændelsesforløb. Diagrammerne kan anvendes til at identificere de hændelsesforløb, der vil være særligt hyppige eller alvorlige, og dermed de steder, hvor flere sikkerhedsforanstaltninger bør være til stede. Barrierediagrammer kan herigennem anvendes som baggrund for en vurdering af, om sikkerhedsniveauet i et anlæg er acceptabelt.

For gasproducerende lossepladser kan metoden anvendes til en systematisering af de faktorer, som har indflydelse på de hændelsesforløb, der kan resultere i en ulykke som involverer gassen fra de gasproducerende lossepladser.

Metoden kan desuden anvendes til en semi-kvantitativ analyse af, om sikkerhedsniveauet for en given losseplads er acceptabelt.

Basis for diagrammerne er bl.a. undersøgelser af lossepladsen som beskrevet i bilag 2 og kapitel 4.

Barrierediagrammernes opbygning og tildeling af point til barrierer i nærværende projekt følger i det væsentlige Miljøstyrelsens Miljøprojekt Nr. 112 /11/.

Der er udarbejdet generelle barrierediagrammer for følgende typer ulykkesscenarier:

- Brand/eksplosion i bygning på lossepladsen
- Brand/eksplosion i bygning udenfor lossepladsen
- Brand i forbindelse med gravearbejde på losseplads

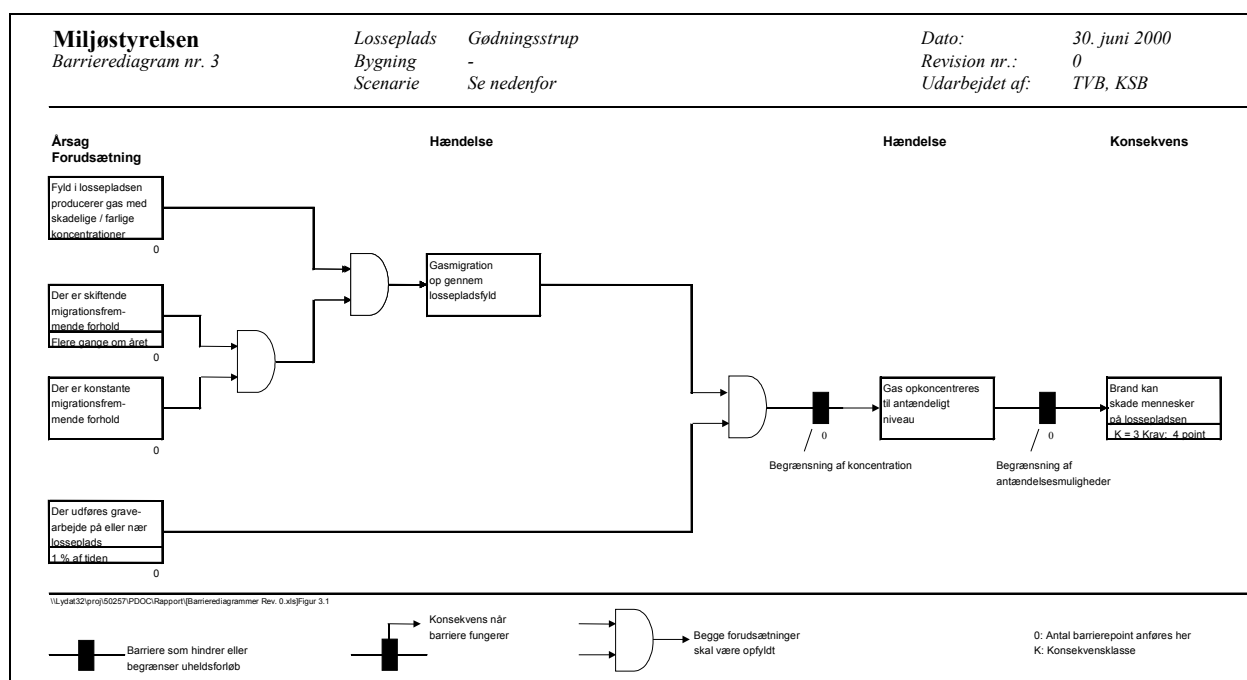
Barrierediagrammer for bygværker (dvs. menneskeskabte konstruktioner, som ikke er bygninger) vil kunne udformes efter samme princip, som de to barrierediagrammer for bygninger. Forskellen kan ligge i vurdering af årsager, barrierer og konsekvenser (se afsnit 3.3.4 og 3.4.5).

Risikovurderingen skal udføres separat for hver bygning/beliggenhed og situation, som ønskes vurderet for den aktuelle losseplads. Det skyldes, at de anbefalede krav til barrierepoint er baseret på ét hændelsesforløb, som ender i en ulykke.

3.2 Opbygning af barrierediagrammer

Opbygningen af barrierediagrammer og risikovurdering følger principperne, som er nøjere beskrevet i bilag 3, afsnit 1.3.1.

I figur 3.1 er vist en illustration af hvorledes et barrierediagram kan se ud. Illustrationen er medtaget som udgangspunkt for denne korte indføring i anvendelse af barrierediagrammer. I bilag 3 afsnit 3 er givet en række eksempler på konkrete anvendelser af barrierediagrammer ved risikovurderingen af lossepladsgas.



Figur 3.1 Eksempel på barrierediagram, scenarie type 3.

I topteksten på barrierediagrammerne er anført rubrikker til entydig identifikation af, hvad der er udført risikovurdering for:

Losseplads	Lossepladsens navn anføres
Bygning	Identifikation af hvilken bygning/bygværk, der er analyseret. Hvis det er muligt, anføres matrikelnummer. Evt. anføres hvilket rum i bygningen, vurderingen er udført for.
Scenarie	I rubrikken kan man anføre hvilken situation, der er analyseret, herunder hvilken anvendelse af bygningen/bygværket/arealet, der er forudsat. Dette kan være relevant, især hvis der er et ønske om at foretage en evaluering af bygningen for flere separate aktiviteter; dag/nat/anvendelsesmåder. Det er desuden muligt at anføre, om det er et bestemt hændelsesforløb eller en bestemt ulykkestype, der er analyseret.

I topteksten anføres desuden dato for analysen, revisionsnummer, og hvem der har udarbejdet denne (navn og firma/myndighed).

I bundteksten er anført forklaring til de symboler, der anvendes i barrierediagrammet. Disse symboler følger beskrivelserne i bilag 3, afsnit 1.3.1.

Barrierer er anført som sorte klodser, som hindrer eller begrænser hændelsesforløb. I de generelle barrierediagrammer er der af hensyn til overskueligheden kun anført nogle generelle barrierer. Disse generelle barrierer dækker i virkeligheden over en række forskellige mulige barrierer, som er beskrevet i de efterfølgende afsnit.

Hvis en generel barriere i den aktuelle risikovurdering dækker over flere uafhængige sikkerhedsforanstaltninger kan man vælge at tegne barrierediagrammet op med flere på hinanden følgende barrierer. Dette kan være en god måde at visualisere sikkerhedsforanstaltninger overfor risikoanalysens interessenter. Alternativt kan man benytte den generelle betegnelse for barrieren og nøjes med at uddybe barrieren i en tilhørende tekst, som indgår i risikoanalysen.

3.3 Årsager og forudsætninger

Udgangshændelserne er markeret som årsager og forudsætninger for risikoen til venstre i barrierediagrammerne.

Følgende overordnede årsager og forudsætninger er vist på de generelle barrierediagrammer:

- Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer
- Der er skiftende migrationsfremmende forhold
- Der er konstante migrationsfremmende forhold
- Bygning/Bygværk med mennesker til stede

I det efterfølgende er der anført hvilke aspekter, der skal vurderes for hver enkelt årsag eller forudsætning, ligesom der er anført forslag til pointgivning for de enkelte årsager og forudsætninger.

Teorien bag pointgivningen er nærmere beskrevet i bilag 3, men som en kort introduktion kan det nævnes, at:

- 0 point i forbindelse med angivelse af hyppighed svarer til, at en hændelse forventes at ske 1 gang pr. år.
- 2 point i forbindelse med angivelse af svigtsandsynligheder for barrierer svarer til, at hyppigheden for den efterfølgende hændelse er reduceret med en faktor 10.

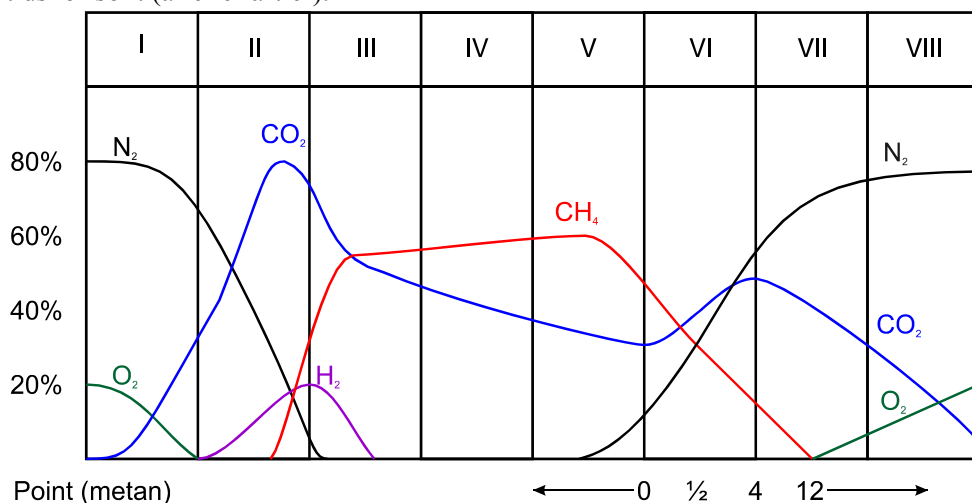
Hvis vurderingen af årsager og forudsætninger viser, at der ikke er behov for flere barrierepoint (dvs. pointsum for årsager og forudsætninger opfylder de anbefalede krav i tabel 3.18) kan risikovurderingen stoppe allerede efter pointgivningen af årsager og forudsætninger.

3.3.1 Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Den første forudsætning, der skal vurderes, er hvorvidt lossepladsen producerer gas i et sådant omfang, at der kan ske en ophobning af skadelige/farlige koncentrationer.

En samlet vurdering af, hvorvidt lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer, foretages ud fra en vurdering af den gasproduktionsrate og de gaskoncentrationer, gasproduktionen kan resultere i.

I bilag 1 afsnit 2 er givet en detaljeret beskrivelse af de parametre, der har indflydelse på gasproduktionen i en losseplads. Idealiseret set kan en losseplads livscyklus, og dermed gasproduktion opdeles i 8 faser som vist i figur 3.2. Figur 3.2 afspejler ikke varigheden af de enkelt faser. De første faser er forholdsvis kortvarige (dage, uger og evt. måneder), medens de sidste faser har en længere tidshorisont (år eller årtier).



Figur 3.2 Idealiseret fremstilling af udviklingen i gassammensætningen i en affaldscelle opdelt i 8 faser /8/.

De i figur 3.2 tegnede udviklinger i gaskoncentrationen gælder for en idealiseret homogen affaldscelle. I virkelige affaldsceller vil forskellige dele af affaldet kunne være i forskellige faser, og gassammensætningen kan derfor være et miks af forskellige faser.

Da cellerne i en losseplads oftest fyldes op over en længere periode (måneder/år), vil de første faser (I-III) ofte være svære at identificere, fordi de forskellige dele af cellen vil være i forskellige faser. De senere faser er så lange, at forskellen i deponeringstidspunktet får mindre betydning, men den fysiske udformning af lossepladsen, affaldets sammensætning, samt driften af lossepladsen kan bevirke, at forskellige dele af affaldet vil være i forskellige faser. Ved risikovurderingen må der tages udgangspunkt i den fase som gælder for den del af lossepladsen, der foretages risikovurdering for. Hvis forskellige dele af lossepladsen er i forskellige faser, kan det være nødvendigt at gennemføre risikovurderingen for flere scenarier. For eksempel hvis der er tvivl om, hvorvidt risikovurderingen skal foretages i forhold til den del af lossepladsen, som ligger tættest på en bygning, men har en lav gasproduktion, eller i forhold til en anden del af lossepladsen, som ligger længere væk, men har en større gasproduktion

På basis af oplysningerne i bilag 1 afsnit 2, vurderes det, at man kan anføre følgende sandsynligheder for at lossepladsen producerer gas i skadelige/farlige koncentrationer afhængig af lossepladsens fase:

Tabel 3.1 Barrierepoint ved vurdering af om koncentration af metan i fylden er farlig

Fase	I-III	IV-V	VI	VII	VIII
Sandsynlighed	-	1	1-0,5-0,01	0,01-0	0
Point	-	0	0-0,5-4	4->12	>12

Faserne I til III er så kortvarige, at der ikke bør udføres risikovurdering på basis af disse.

For fase IV og V vurderes det, at der altid eller næsten altid vil være potentielt farlige koncentrationer i lossepladsfylden.

For fase VI begynder billedet at ændre sig. De anførte barrierepoint svarer til begyndelsen, midten henholdsvis slutningen af fasen.

For fase VII svarer de 4 barrierepoint til begyndelsen af fasen, medens ”maksimum” point tildeles allerede en fjerdedel inde i fasen.

For fase VIII kan der ikke optræde brandbare metankoncentrationer.

I tabel 3.2 er anført barrierepoint mht. vurdering af sandsynlighed for skadelige koncentrationer af kuldioxid i fylden. Med skadelige koncentrationer menes i denne sammenhæng, om koncentrationen af kuldioxid er dødelig.

Tabel 3.2 Barrierepoint ved vurdering af om koncentration af kuldioxid i fylden er skadelig

Fase	I-III	IV-V	VI	VII	VIII
Sandsynlighed	-	1	1	1	0,5-1
Point	-	0	0	0	0-½

Som det fremgår af tabel 3.2, vil der i faserne IV-VII altid eller næsten altid være mulighed for skadelige koncentrationer af kuldioxid i fylden jf. bilag 1, afsnit 1.2. Sandsynligheden for kvælende koncentrationer i fylden fastsættes jf. tabel 3.2, medens sandsynligheden for koncentrationer, som kan medføre gener, sættes til 1 for faserne IV til VIII og derfor tildeles 0 point.

Risikovurderingen bør dog primært udføres på baggrund af farlige metankoncentrationer. Herefter kan man evt. vurdere, om der vil være behov for en vurdering af gener/farer på grund af kuldioxid. Sidstnævnte vurdering vil være mest relevant for vurdering af lossepladser, der befinder sig i de sidste faser, hvor metankoncentrationen er aftagende.

3.3.2 Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Skiftende migrationsfremmende forhold er en udgangshændelse, som vurderes at være nødvendig for at gasmigration kan finde sted i tilstrækkelig store mængder.

Hvis lossepladsen ligger tæt på havet, kan tidevand påvirke grundvandsspejlet i lossepladsen og dermed det frie gasvolumen i fyldet. Når vandstanden i havet stiger forøges trykket i fyldet og dermed gasmigrationen op gennem fyldet.

Vejrforhold, f.eks. frost eller voldsomt regnvejr kan lukke jordoverfladen og tvinge gassen til at migrere vandret og op under bygninger.

Pludselige eller langvarige fald i atmosfæretrykket kan forårsage en øget gasmigrationen fra fyldet.

3.3.2.1 Vurdering af hyppighed

På baggrund af bilag 1 afsnit 3 skønnes det, at langvarige fald i atmosfæretryk over minimum 2 døgn med en samlet trykændring på minimum 15 hPa er en nødvendig

forudsætning for, at der sker en afgørende stigning i gasmigrationen. Trykfald i denne kategori forekommer ca. 20-30 gange pr. år i Danmark.

For lossepladser, hvor jordoverfladen er lukket, f.eks. asfalteret, gives der derfor -2 point, idet trykfald ca. halvdelen af gangene antages at give anledning til migrationsfremmende forhold, jf. tabel 1.1. i bilag 3.

Hvis jordoverfladen ikke er lukket, forventes det, at trykfaldet kun kan medføre risiko for væsentlig gasmigration, hvis det finder sted samtidig med, at der er hård frost eller regnvejr, hyppigheden tildeles derfor -1 point svarende til ca. 3-4 gange om året.

For kystnære lossepladser skal det vurderes, om tidevandsforhold kan give et betydende bidrag til hyppigheden af gasmigration i fylden. Ændringer i grundvandspejlet på 0,3 m vurderes at kunne give anledning til gasmigrationsfremmende forhold. Målinger på en losseplads ved Øresund viste, at sådanne ændringer forekom ca. 1 gang i kvartalet, svarende til -1 point. For andre beliggenheder af lossepladsen kan betydningen af tidevandets påvirkning af grundvandspejlet dog have større betydning.

Den samlede hyppighed af skiftende migrationsfremmende forhold bestemmes som summen af hyppigheder og samlet pointsum tildeles derefter efter bilag 3, tabel 1.3.

Tabel 3.3 Barrierepoint ved vurdering af skiftende migrationsfremmende forhold

Hændelse	Point
Pludselige eller langvarige fald i atmosfæretrykket for lossepladser med lukket overflade	-2
Pludselige eller langvarige fald i atmosfæretrykket for lossepladser, hvor overfladen ikke er lukket	-1
Kystnære lossepladser, hvor tidevandet påvirker grundvandspejlet i lossepladsen	-1

3.3.3 Der er konstante migrationsfremmende forhold

Konstante migrationsfremmende forhold er en betinget årsag, dvs. en forudsætning, som er medvirkende til at gasmigration kan finde sted. Det vil sige, at såfremt de skiftende migrationsfremmende forhold, som er beskrevet i forrige afsnit, indtræffer, skal disse forudsætninger også være opfyldt, for at gasmigrationen finder sted.

De konstante migrationsfremmende forhold udtrykker hermed en sandsynlighed for at gassen kan migrere igennem fyldet på lossepladsen, givet at der er en drivende kraft til stede.

3.3.3.1 Vurdering af sandsynlighed

De konstante migrationsfremmende forhold, som beskrives nedenfor, kan benyttes til at vurdere en sandsynlighed for, at gassen kan vandre igennem fyldet. Sandsynligheden for de enkelte migrationsfremmende forhold vurderes og point tildeles jf. nedenstående retningslinier.

Konstante migrationsfremmende forhold tildeles point lig med summen af pointene for de enkelte faktorer.

På baggrund af bilag 1 fastsættes følgende point, for de parametre, som har betydning for gassens mulighed for at migrere igennem fylden. Pointene er fastsat empirisk, udfra en vurdering af i hvilket omfang de enkelte faktorer vil virke hæmmende på gasmigrationen. Ved tildelingen af point er der taget udgangspunkt i

de forhold hvor gasmigrationen ikke hæmmes, og disse er tildelt 0 point, f.eks. en permeabilitet på større end 10^{-11} . Udfra dette nulpunkt er foretaget en graduering af forholdene, således at forhold der vurderes at reducere gasmigrationen ca. 10 gange tildeles 2 point.

3.3.3.2 Permeabiliteten

Permeabiliteten af fyldet har betydning for gassens mulighed for at migrere gennem fyldet. Jo lavere permeabilitet af fyldet des sværere er det for gassen at migrere gennem fyldet. Point tildeles iht. nedenstående tabel 3.4:

Tabel 3.4 Barrierepoint for permeabiliteten af det gasproducerende fyld

Permeabilitet (m ²)	Point
10^{-11}	0
10^{-12}	1
10^{-13}	2
$<10^{-13}$	4

En gaspermeabilitet på mere end 10^{-11} , svarende til groft eller mellem groft sand vurderes ikke at hindre gassens migration i fylden, medens en gaspermeabilitet på mellem 10^{-12} og 10^{-13} vurderes at begrænse gasmigrationen, jf. tabel 4.3 i bilag 1.

3.3.3.3 Grundvandsspejl

Hvis grundvandsspejlet står lavt, har ovenstående skiftende migrationsfremmende forhold større indflydelse på gasmigrationen, end hvis grundvandsspejlet står højt. Gasreservoirs størrelse er vigtig for, om der flyttes meget jordgas som følge af et fald i atmosfæretrykket. Jo længere der er ned til grundvandet (eller en anden ikke-permeabel zone), og jo større porøsitet jorden har, des mere jordluft vil blive tvunget til at migrere pga. et givet trykfald. Ændringer i gasmigrationens størrelse vil specielt kunne observeres for de mindre mægtigheder af den umættede zone, op til ca. 10 m mægtighed. Mægtigheder af den umættede zone på mere end 10 m vurderes ikke at give anledning til væsentlig forøgelse af gasmigrationen.

Der gives point som anført i tabel 3.5.

Tabel 3.5 Barrierepoint for den umættede zones størrelse

Højde af umættede zone	Point
≥ 10 m	0
5 - 10 m	0,5
2-5 m	1
<2 m	3

3.3.3.4 Tryk i fylden

Endelig har trykket i fylden en betydning for, om gassen kan migrere igennem fylden, se tabel 3.6. Trykket i fylden vil hovedsageligt være afhængig af to forhold, dels gasproduktionens størrelse, dels permeabiliteten i fylden. Et moderat overtryk på f.eks. 10 Pa i pladsen kan derfor både være et udtryk for en lav gasproduktion og en lav permeabilitet, eller en højere gasproduktion og en højere permeabilitet. Gasmigrationen fra to pladser med det samme overtryk i fylden kan derfor være forskellig. Dette forhold bliver der dog taget højde for ved vurderingen af permeabiliteten.

Tabel 3.6 Barrierepoint for overtryk i poreluften

Overtryk i fylden (Pa)	Point
>1000	0
>100	1
>10	2
<10	3

3.3.4 Bygning/Bygværk med mennesker til stede

Med hensyn til forudsætningen ”Bygning hvor der vil være mennesker til stede” skal der blot anføres sandsynligheden for, at der er mennesker tilstede i den bygning eller det bygværk, der skal vurderes.

Der gives barrierepoint iht. samme principper som i bilag 3 afsnit 1.4.2:

Tabel 3.7 Barrierepoint for sandsynlighed for at der er mennesker til stede

Sandsynligheder for mennesker til stede	< 0,2	0,2-<0,4	0,4-0,7	> 0,7
Point	se nedenfor	1	0,5	0

For kontorbygninger og lignende bør gives $\frac{1}{2}$ point, og for boliger bør gives 0-0,5 point, da mennesker kan være til stede imellem 50 og over 70 % af tiden.

For et bygværk, hvor der sjældent er mennesker tilstede, vil sandsynligheden for tilstedeværelse være mindre, f.eks. ca. 4 gange 1 time om året svarende til en sandsynlighed på $4 * 1 [\text{time}/\text{år}] / 365 [\text{dage}/\text{år}] / 24 [\text{timer}/\text{dag}] = 0,0005$ eller 6 point, jf. bilag 3, afsnit 1.4.2.

Erfaringer fra ulykker i bygværker, se bilag 5, viser dog, at ulykkerne netop indtræffer i situationer, hvor mennesker er tilstede for at servicere installationer eller lignende i bygværket. For et bygværk bør der derfor ikke gives point for barrieren ”Begrænsning af antændelsesmuligheder”, se afsnit 3.4.5.

3.4 Barrierer

På barrierediagrammerne i bilag 3 afsnit 2 er defineret følgende generelle barrierer, hvor barriererne repræsenterer eksisterende forhold, som hindrer eller begrænser hændelsesforløbet:

- Begrænsning af udsivning fra losseplads
- Gasmigration begrænses udenfor losseplads
- Begrænsning af gasindtrængen i bygning/bygværk
- Begrænsning af gaskoncentration i bygning/bygværk
- Begrænsede antændelsesmuligheder

Hver barriere, som er vist på diagrammerne, kan i virkeligheden indeholde flere separate barrierer, dvs. flere forhold, som kan begrænse eller hindre forløbet, som er vist i barrierediagrammet.

I de efterfølgende afsnit oplystes de forhold, som bør vurderes indenfor ovennævnte kategorier af barrierer.

Barrierer kan være rent fysiske foranstaltninger, som f.eks. etablering af en afværgeforanstaltning, eller et fysisk eksisterende forhold, som f.eks. stor afstand imellem lossepladsen og den bygning som vurderes. Barrierer kan også være ”ikke-

fysiske" regler for handlinger, f.eks. rygeforbud. Endelig kan barrierer være blandinger af fysiske og ikke-fysiske foranstaltninger, f.eks. en alarm for høj gaskoncentration, som skal få beboere til at forlade bygningen.

Barriererne i de generelle barrierediagrammer behøver ikke vurderes successivt. Man kan tildele barrierepoint i den rækkefølge man finder mest hensigtsmæssig og stoppe arbejdsprocessen, når der er tilstrækkelig med point iht. tabel 3.18.

3.4.1 Begrænsning af udsivning fra losseplads

I /6/ foreslås en sandsynlighed for, at en indkapsling af en losseplads svigter, på imellem 0,1 og 0,01.

Barrierepoint fastsættes ud fra ovenstående og vil derfor være 2-4 point.

Er der ledninger, som gennembryder indkapslingen, gives 0 point for indkapslingen, hvis gennembrydningen bevirker, at gassen kan ledes hen mod den bygning, som risikovurderes.

Afværgeforanstaltninger, som begrænser udsivningen fra lossepladsen, f.eks. ved bortventilering og evt. afbrænding af gassen kan også tildeles barrierepoint. Antallet af barrierepoint bør baseres på en vurdering af den aktuelle afværgeforanstaltning, men barrierepoint vil nok være i størrelsesordenen 2-4 point, spændende over niveauet for et passivt dræn til et aktivt ventilationsanlæg.

Det bemærkes, at indkapslingen af lossepladsen kun tildeles point, hvis den er placeret således, at den kan forhindre migration mod den bygning, der udføres risikovurdering for. Ved ulykken ved Skellingsted har indkapslingen muligvis virket modsat, idet den muligvis har forøget trykket i fylden og dermed øget sandsynligheden for horisontal gasmigration mod nabogrundene.

Tabel 3.8 Barrierepoint for af begrænsning af udsivning fra losseplads

Beskrivelse	Point
Indkapsling af losseplads gennembrudt af ledninger	0
Indkapsling af losseplads uden gennembrydning	2-4
Afværgeforanstaltninger, som begrænser udsivning fra losseplads	2-4

3.4.2 Gasmigration begrænses uden for losseplads

Begrænsning af gasmigration skal kun vurderes uden for lossepladsen. Gasmigration inde for lossepladsen er vurderet i afsnit 3.3.3.

Den horisontale gasmigration uden for lossepladsen kan opdeles i to dele, en konstant gasudsivning, som skyldes tryk og koncentrationsforskelle mellem lossepladsen og omgivelserne, og en pulserende gasudsivning som skyldes ændringer i de meteorologiske forhold, primært ændringer i atmosfæretrykket. Den samlede gasmigration vil være en sum af de to dele, som er beskrevet i henholdsvis afsnit 3.4.2.1 og 3.4.2.2.

I visse tilfælde vil gasmigration kunne ske langs menneskeskabte gasmigrationsveje som f.eks. kloakker og el-ledninger. Det kan derfor være nødvendigt at medtage de menneskeskabte migrationsveje i vurderingen af gasmigrationen jf. afsnit 3.4.2.4.

I bilag 1 kapitel 4.4 er givet en mere uddybende beskrivelse af de mekanismer, der styrer gasmigrationen.

3.4.2.1 Vurdering af kontinuert gasudsivning

Ved vurderingen af, i hvilket omfang der sker en kontinuert gasudsivning fra lossepladsen, tages udgangspunkt i trykket i lossepladsen, lossepladsens udformning, samt om der sker metanoxidation.

Den samlede gasflux ud af lossepladsen kan beregnes ud fra Darcy's lov:

$$q = -C \frac{k}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \text{ (Darcy's lov),}$$

hvor:

- q er fluxen gennem et areal ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ sek}$)
- C er gaskoncentrationen (m^3/m^3)
- k er gaspermeabiliteten (m^2)
- μ er viskositeten ($\text{N}/\text{sek m}^2$), for metan er $\mu = 11 \times 10^{-6} \text{ Ns}/\text{m}^2$
- Δp er trykforskellen (Pa) over længden L (meter)

Ud fra resultaterne af undersøgelser om gasfanens udbredelse ved Skellingsted /9/, defineres gasfanens udbredelse som den afstand, hvor fluxen er $0,05 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Hvis der tages udgangspunkt i at jordoverfladen er lukket, vil gasfanens udbredelse kunne udregnes efter:

$$L_{\text{Stationær}} = -C \frac{k}{11 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{\Delta p}{0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}} \right) \cdot 3600 \text{ s/h}$$

I nedenstående tabel 3.9 er gasfanens udbredelse beregnet ved at anvende følgende værdier:

- $\Delta p = 10 \text{ hPa}$. Overtryk i lossepladsen er 10 hPa ,
- $C = 0,5$. Metankoncentration i lossepladsen er $50 \% \text{ v/v}$

Tabel 3.9 Udbredelse af gasfanen ved en flux på $0,05 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$

Jordtype	k (m^2)	L (m)
Groft Sand	2×10^{-11}	65
Mellem groft sand	1×10^{-11}	33
Fint sand	1×10^{-12}	3
Moræne ler	1×10^{-13}	< 1

Lossepladsens udformning herunder dybde under det omgivende terræn har betydning for gasfanens størrelse. Hvis grundvandsspejlet står op i lossepladsen, vil det være højden af den umættede zone, der har betydning for gasfanens udbredelse.

Metanoxidation vil også have betydning for gasfanens udbredelse. Metanoxidationen vil bl.a. være afhængig af, i hvor høj grad ilten fra atmosfæren kan trænge ned i jorden. For jorde med lav permeabilitet, eller hvor jordoverfladen er lavpermeabel som følge af f.eks. nedbør eller fast belægning, vil metanoxidationen være meget lav. Det er derfor kun for jorde med en permeabilitet $k > 10^{-12}$, hvor metanoxidation medtages ved risikovurderingen, jf. bilag 1, afsnit 4.4.1.

Tabel 3.10 Fyldhøjden/højden af den umættede zone og metanoxidationens betydning for gasfanens udbredelse

Fyldhøjden under terræn/ højden af den umættede zone	Gasfanens udbredelse i procent af afstanden udregnet med lukket jordoverflade	
	uden metanoxidation $k < 10^{-12}$	med metanoxidation $k > 10^{-12}$
20 m	100 %	98 %
15 m	91 %	88 %
10 m	87 %	83 %
5 m	74 %	67 %
2 m	34 %	26 %

3.4.2.2 Vurdering af varierende gasmigration

I det omfang jordoverfladen er lukket, vil fald i atmosfæretrykket bevirke en horisontal gasmigration. Mekanismerne bag gasmigrationen er beskrevet i bilag 1 i afsnittene 4 og 5. Gasmigrationen vil følge Darcy's lov og vil være afhængig af en række faktorer, bl.a. hastigheden hvormed trykket falder, gasporøsiteten i jorden, gaspermeabiliteten i jorden og viskositeten af poreluften.

Gasmigrationsafstanden i forbindelse med et givet lavtryk kan estimeres, bl.a. ved at betragte en 2-dimensionel model. Ved et kraftigt trykfald, hvor trykket falder 1 hPa/time over en periode på 48 timer fås de i tabel 3.11 viste maksimale migrationsafstande ($L_{\text{Varierende}}$).

Tabel 3.11 Afstande for gastransport ($L_{\text{Varierende}}$) som følge af et kraftigt atmosfærisk trykfald på 1 hPa pr. time i 48 timer

	k (m^2)	L (m)
Groft sand	2×10^{-11}	11
Mellem sand	1×10^{-11}	8
Fin sand	1×10^{-12}	3
Moræneler	1×10^{-13}	1

3.4.2.3 Den maksimale gasmigrations afstand

Barrierepoint for horisontal gasmigration beregnes ud fra den maksimale gasmigrations afstand (L_{max}). Den maksimale gasmigrationsafstand beregnes som summen af de afstande, der er beregnet i afsnit 3.4.2.1 og 3.4.2.2.

$$L_{\text{max}} = L_{\text{stationær}} + L_{\text{varierende}}$$

Hvis afstanden L mellem lossepladsen og bygningen er væsentlig mindre end L_{max} , vil gasmigrationen bevirke, at der med høj grad af sandsynlighed vil forekomme lossepladsgas i poreluften under bygningen. Hvis afstanden er i samme størrelsesorden som L_{max} , så er det sandsynligt, at lossepladsgas i ca. 10 % af tiden vil forekomme under bygningen. Hvis L er større end L_{max} , så vil afstanden være så stor, at gasfanen kun meget sjældent vil kunne nå bygningen. I nedenstående tabel 3.12 er tildelt barrierepoint for den horisontale gasmigration.

Tabel 3.12 Barrierepoint for den horisontale gasmigration som funktion af afstanden mellem bygning og losseplads

Afstand	Barrierepoint
$L \leq 1/2 L_{\text{max}}$	0
$L \approx L_{\text{max}}$	2
$L \geq 2 \times L_{\text{max}}$	6
$L \geq 4 \times L_{\text{max}}$	12

3.4.2.4 Menneskeskabte migrationsveje

Hvis der mellem lossepladsen og bygningen findes menneskeskabte migrationsveje, f.eks. kloakker, drænledninger eller større el- og gasledninger, kan disse ændre gasmigrationen og skal derfor inddrages i risikovurderingen.

Menneskeskabte gasmigrationsveje medtages kun i risikovurderingen, hvis de bevirker, at gassen ledes direkte frem til bygningen eller til dennes indflydelseszone, f.eks. hvis ledningen er ført i jorden helt hen til bygningen og samtidig er ført igennem eller umiddelbart op ad det gasproducerende område således, at der er skabt en direkte transportvej fra det gasproducerende fyld til bygningen.

For de fleste ledningstyper gælder, at gasmigrationen vil ske langs med ledningen i den gruskastning, der er omkring ledningen, men for både kloak og drænledninger gælder, at gassen også kan transporteres inde i selve ledningen. Gasmigration langs ledningerne vil specielt kunne ændre gasmigrationsbilledet i jorde med en lav permeabilitet. I situationer, hvor gasmigrationen vil kunne ske langs en ledning, beregnes den maksimale gasmigrationsafstand ($L_{\max}$) som beskrevet for beregning af gasfanens udbredelse, idet der anvendes en gaspermeabilitet som for groft sand. I lossepladser uden overtryk bliver migrationsafstanden ($L_{\max}$) således 11 meter.

Gasmigrationen i kloakker eller ikke vandfyldte drænrør vil være langt større end gasmigrationen langs rørene. I sådanne tilfælde vil det være nødvendigt at foretage en individuel vurdering.

3.4.3 Begrænsning af gasindtrængen

Der trænger næsten altid jordluft ind i danske huse. Fra radonmålinger kan man vurdere, at jordluft i gennemsnit udgør omkring 0,1 % af den samlede årlige lufttilførsel. Den resterende del er frisk udeluft. Der er dog store tidslige variationer. Disse styres primært af meteorologiske forhold som temperatur og vind. Ligeledes er der store variationer fra hus til hus forårsaget af geologiske og bygningstekniske forskelle. Det vurderes, at trykdreven migration er af afgørende betydning for indtrængningen af såvel ren jordluft og jordluft forurenet med lossepladsgas.

3.4.3.1 Permeabilitet

Den vigtigste faktor i relation til gasindtrængen vurderes at være gaspermeabiliteten for jordlagene omkring huset. Tør og/eller sandet jord vil have en høj permeabilitet, mens vandmættet og/eller leret jord vil have en lav permeabilitet (se bilag 1).

Hvis gaspermeabiliteten for jordlagene under huset adskiller sig væsentligt fra permeabiliteten i jorden omkring lossepladsfylden, kan der evt. tildeles særskilte point for dette jordlag. Point tildeles efter principperne i afsnit 3.3.3.1.

3.4.3.2 Grundvandsspejl

Som nævnt i afsnit 3.3.3 har grundvandsspejlets placering og dermed gasreservoirets størrelse betydning for gasmigrationen. Hvis man skal vurdere effekten af grundvandsspejlet for et hus, som ikke ligger på lossepladsfylden, kan man benytte samme principper, som anført i afsnit 3.3.3.2.

3.4.3.3 Bygningens konstruktion

Bygningens konstruktion vil have betydning for hvor godt gasindtrængning i bygningen begrænses.

For bygninger uden kapillarbrydende lag vurderes det, at der vil være en næsten lineær sammenhæng mellem indtrængning og husets lækageareal mod jord således,

at hvis halvdelen af revnerne i et utæt betondæk tætnes, da forventes det, at indtrængningen af jordluft halveres. Dette forhold vurderes derimod ikke at gælde for huse med et kapillarbrydende lag, med mindre revnerne er meget små: Hvis der først er revner med en bredde større end en brøkdel af en millimeter (dvs. hvis først dækket er "punkteret"), så forventes det, at indtrængningshastigheden er uafhængig af yderligere revnedannelse. I korthed kan man sige, at et kapillarbrydende gruslag udgør en ideel kobling mellem inhomogeniteter og sprækker i jord såsom moræneler og det revnesystem i betondækket, hvor luften trænger ind i et hus med terrændæk.

Langt de fleste nyere bygninger er opført med et kapillarbrydende lag. Derfor bør vurderingen af betongulve udføres ud fra den antagelse, at gulvet er opført på et kapillarbrydende lag, medmindre der foreligger konkrete oplysninger om andet.

Antallet og fordelingen af revner i et terrændæk vil være af betydning for, hvor i konstruktionen lossepladsgas kan komme ind. Den mindst risikable situation er, hvis revnerne er jævnt fordelt over dækket således, at indtrængningen er så diffus som muligt. I det tilfælde er der størst chance for, at husets almindelige ventilation kan holde gaskoncentrationen under eksplosionsniveau. Det værste tilfælde er, hvis indtrængningen er begrænset til et lille rum med stillestående luft, f.eks. et skab, teknik- eller depotrum. Sådanne situationer kan tænkes at opstå ved store revner omkring installationer, der føres ind i huset via dæk eller kældervæg, større sætningsrevner og mellemrum mellem betondæk og ydermur. Sidstnævnte tilfælde kan være særlig problematisk, hvis der samtidig forekommer elinstallationer.

Terrændæk tildeles barrierepoint efter tabel 3.13.

Det vides, at husenes kælderforhold har stor betydning for radonkoncentrationen i husenes stuer. Eksempelvis er der således i gennemsnit væsentligt mindre radon i huse med fuld kælder end huse uden kælder. Det vurderes, at dette primært skyldes, at radon "bortventileres", inden det når beboelsesdelen.

En ventileret krybekælder defineres som et lille hulrum under gulvet, hvor ventilationen typisk er naturlig ventilation gennem riste under gulvniveau til det fri. Huse med naturligt ventileret krybekælder gives barrierepoint iht. tabel 3.14. Hvis der er el-installationer i krybekælderen, bør krybekælderen ikke tildeles barrierepoint.

Huse med fuld ubeboet kælder gives 0 point, idet gas vil kunne ophobes i kælderen, antændes af f.eks. elinstallationer eller fyr og derved give en eksplosion, som mest sandsynligt også vil ødelægge den ovenliggende etage. For huse med beboet kælder, bør risikovurderingen udføres for kælderrummet, fordi folk opholder sig i kælderen, og kælderen gives derfor ikke point. Hvis kælderen anvendes sjældent, og/eller der er få eller ingen antændelseskilder i kælderen, kan der udføres en sammenlignende risikovurdering for huset baseret på en vurdering af risikoen for en ulykke i stueetagen, hvor kælderen fungerer som barriere i lighed med en krybekælder.

Hvis der både er terrændæk og (krybe)kælder, betragtes de som to uafhængige barrierer i serie. Point for begrænsning af gasindtrængen pga. bygningskonstruktionen tildeles derfor som summen af point for terrændæk og krybekælder.

Tabel 3.13 Barrierepoint for vurdering af begrænsninger i gasindtrængen på grund af terrændæk

Beskrivelse	Point
Lerstampet gulv	0
Betondæk i dårlig stand med synlige revner eller betondæk med utætte rørgennemføringer	1
Betondæk i god stand med tætte rørgennemføringer (ingen synlige indtrængningssteder)	2-3
Radonsikret betondæk	4

Tabel 3.14 Barrierepoint for vurdering af begrænsninger i gasindtrængen på grund af (krybe)kælder

Beskrivelse	Point
Dårlig ventileret krybekælder, riste lukkede eller tilstoppede	0
Godt naturligt ventileret (krybe)kælder med el-installationer	0
Godt naturligt ventileret (krybe)kælder uden el-installationer	1
Aktiv ventileret (krybe)kælder uden el-installationer	3-4

3.4.3.4 Afværgeforanstaltninger

Hvis der er udført afværgeforanstaltninger til begrænsning af indtrængning af gas i bygningen, skal afværgeforanstaltningens effektivitet vurderes.

Passiv udluftning under en bygning kan opnås med et beluftet dræn, eller ved at placere udluftningsrør under bygningen med afkast til det fri. Ved fald i atmosfæretrykket vil det være lettere for gassen at aflastes gennem udluftningsrørene fremfor at trænge ind i bygningen. Passiv udluftning tildeles 2-3 point afhængigt af, hvor tæt udluftningsrørene er placeret under bygningen.

Afværgeforanstaltningen kan også udføres som et aktivt ventileret dræn. De aktivt ventilerede afværgeforanstaltninger vurderes generelt at have en større sikkerhed end de passive, idet de ofte er bedre og mere grundigt designet. De aktive dræn har dog den svaghed, at de kan fejle på grund af mekaniske eller elektroniske fejl. Aktiv udluftning tildeles 2-4 point afhængigt af, hvor veludviklet foranstaltningerne er, herunder afværgeforanstaltningens effektivitet under drift og risikoen for utilsigtede driftstop.

Tabel 3.15 Barrierepoint for afværgeforanstaltning

Beskrivelse	Point
Passiv udluftning under bygning	2-3
Aktiv ventilering under bygning	2-4

3.4.4 Begrænsning af gaskoncentration i bygning/bygværk

I bilag 1, afsnit 4 er der foretaget beregninger af koncentrationer af lossepladsgas i bygninger for forskellige gasindtrængningsrater og forskellige luftskifter.

På baggrund heraf vurderes det, at ved aktiv ventilering af bygninger må det anses for usandsynligt, at der kan forekomme eksplosive koncentrationer af lossepladsgas i bygningen. Ventilationsanlægget vil dog kunne være ude af drift enten pga. serviceeftersyn eller pga. svigt af anlægget. Her kan man udføre en traditionel kvantitativ risikoanalyse til fastlæggelse af anlæggets svigtsandsynlighed, f.eks. en fejl-træs-analyse, se f.eks. /7/.

Oftest vil man dog kunne anvende mere overordnede erfaringer og skønne, at anlægget serviceres f.eks. 3 dage om året og at svigtsandsynligheden er væsentlig mindre end denne størrelse. Herved kan man opnå 4 barrierepoint ved aktiv ventilation af bygningen.

For naturligt luftskifte i bygninger vil der almindeligvis også forekomme en fortynding af gaskoncentrationen til under nedre eksplosionsgrænse. Det anbefales, at man tildeler 1 point for naturligt luftskifte i en bygning, svarende til en reduktion af sandsynligheden for at gassen stratificerer eller på anden måde ophobes ujævnt i bygningen, se tabel 3.16.

Tabel 3.16 Barrierepoint for begrænsning af gaskoncentration i bygning

Beskrivelse	Point
Naturlig ventilation i bygning	1
Aktiv ventilation af bygning	4

3.4.5 Begrænsede antændelsesmuligheder

Begrænsning af mulige antændelsesmuligheder kan f.eks. omfatte nedenstående tiltag, med vurderede barrierepoint anført, se tabel 3.17.

Tabel 3.17 Vurdering af begrænsninger af antændelsesmuligheder

Beskrivelse	Point
Ingen brug af åben ild/rygeforbud	2
Ex-sikring af el-installationer	6
Forebyggelse af gnistdannelser f.eks. fra værktøj	2

Hvis flere af ovenstående barrierer mod antændelse er tilstede, skal det overvejes hvilket scenarie, sikkerhedsvurderingen udføres for. Ofte vil der kun skulle tildeles point for én af barriererne mod antændelse og ikke for flere.

I eksempel 1B i bilag 3 afsnit 3 er der derfor foretaget en analyse af et scenarie, hvor antændelsen skyldes, at Ex-sikre el-installationer svigter (6 point). I eksempel 1C er samme lokalitet analyseret, men antændelseskilden er her antaget at være en håndværker, som er skyld i antændelsen enten pga. fejlagtig brug af værktøj eller overtrædelse af rygeforbud (2 point).

3.5 Vurdering af sikkerhedsniveau

Når man har udstyret sit barrierediagram med point, kan man anvende det til at vurdere, om den risiko, hændelsesforløbene udgør, er for stor. For at kunne gøre dette, skal man bruge følgende:

- En vurdering af omfanget af konsekvenserne
- Et ønsket sikkerhedsniveau.

3.5.1 Konsekvensvurderinger

Ved vurdering af konsekvenser af en hændelse ved en losseplads vil det ofte være svært eller decideret umuligt, at vurdere præcist hvor alvorlige konsekvenserne kan blive. Dette skyldes blandt andet, at der ikke findes fyldestgørende modeller for migrationen gennem jordlagene og gasindtrængen i bygninger.

For at vurdere konsekvensernes omfang anbefales det, at man tager udgangspunkt i de skadetyper, der har fundet sted, se bilag 5, og de tilhørende konsekvensklasser,

som er beskrevet nedenfor. I bilag 5 afsnit 4 er der foretaget en sammenstilling af skadetyper og konsekvensklasser. Som det fremgår af bilag 5 afsnit 4 og bilag 3 afsnit 3 vil risikovurderingen af lossepladser oftest være baseret på konsekvensklasse 5, konsekvensklasse 4 eller i enkelte tilfælde konsekvensklasse 3.

Konsekvensklasse 5

Denne konsekvensklasse anvendes, når der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede personer i lossepladsens omgivelser. Med omgivelser menes traditionelt omgivelser uden for en virksomhed, dvs. der kan forekomme dødsfald blandt personer, som ikke har nogen relation til lossepladsen. Konsekvensklassen skal derfor også anvendes ved risikovurdering af bygninger på selve lossepladsen, hvis denne er nedlagt og personerne i bygningen ikke har nogen relation til lossepladsen. Se eksempel 1A i bilag 3 afsnit 3.

Konsekvensklasse 4

Anvendes ved konsekvenser hvor der er mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen. Med ansatte med relation til lossepladsen menes i denne sammenhæng ansatte på selve lossepladsen eller håndværkere, som tilser bygninger eller bygværker på eller nær ved lossepladsen. Sidstnævnte omfatter kun bygninger eller bygværker, hvor håndværkerne er oplyst om, at der er mulighed for gasforekomst. Se eksempel 1C i bilag 3 afsnit 3.

Konsekvensklasse 3

Mindre alvorlig personskader, som f.eks. skyldes antændelse af mindre gasmængder i det fri, vil være et typisk eksempel på konsekvenser fra hændelser på lossepladser, som kan placeres i denne konsekvensklasse. Se eksempel 3A i bilag 3 afsnit 3.

Konsekvensklasse 4 og 5 skønnes at være de klasser, man oftest skal vurdere sikkerhedsniveauet for.

3.5.2 Sikkerhedsniveau

Det ønskede sikkerhedsniveau repræsenteres ved en række krav til det mindste antal point, der skal opnås i hvert hændelsesforløb, relativt til konsekvensklassen.

Ved risikovurdering af bygninger anbefales nedenstående minimumskrav til barrierepoint. Baggrunden for de anbefalede krav til barrierepoint er nærmere beskrevet i bilag 3 afsnit 1.

Tabel 3.18 Anbefalede minimumskrav til antal barrierepoint

Beskrivelse	Omfang	Konsekvens- klasse	Barrierepoint
Der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede blandt personer uden relation til lossepladsen	Stor ulykke	5	12
Der mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen	Alvorlige konsekvenser	4	8
Der er mulighed for mindre alvorlige personskader og/eller betydelig beskadigelse af bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen	Betydelige konsekvenser	3	4
Der er ikke tale om skader på personer eller miljø, men kun i mindre omfang skade på bygninger/ bygværker på eller i nærheden af lossepladsen	Mærkbare konsekvenser	2	2
Hændelser, der medfører mindre forstyrrelser, men ikke farer	Ubetydelige konsekvenser	1	0
Hændelser, som ikke medfører farer	Ingen konsekvenser	0	-

3.5.3 Vurdering af sikkerhed

Det forventes, at man f.eks. undersøger 2-3 bygninger med forskellig lokalisering i forhold til lossepladsen, for at opnå en samlet vurdering af lossepladsen. De anbefalede krav til barrierepoint skal så være opfyldt for hver enkelt bygning.

Hvis bygningen vurderes at have særlig værdi eller anvendes til særligt sårbare formål, f.eks. historiske bygninger hhv. vuggestuer, bør det overvejes at stille skærpede krav til antallet af barrierepoint og hermed sikkerhedsforanstaltninger.

Kan de anbefalede krav til barrierepoint ikke opfyldes for en given bygning, må man vurdere, om en forhøjet risiko kan accepteres af brugerne og myndighederne.

På baggrund af vurderingen kan det besluttes, om der skal:

- udføres supplerende undersøgelser til nærmere afklaring af risikoen eller
- udføres afværgeforanstaltninger

Risikovurderingen kan også anvendes i forhold til en prioritering af indsatsen over for lossepladsgas, både med hensyn til supplerende undersøgelser/monitoring og afværgeforanstaltninger.

4 Undersøgelser af lossepladser

4.1 Indledning

I det foregående er der peget på en række informationer, som er nødvendige for at foretage en relevant risikovurdering. For at sikre, at alle disse informationer indhentes på det mest hensigtsmæssige tidspunkt i undersøgelsesforløbet, er det i nærværende afsnit beskrevet hvorledes dette gøres.

Undersøgelser af lossepladsgas adskiller sig fra undersøgelser af traditionelle jord- og grundvandsforureninger på en række områder. Dette skyldes dels lossepladsgassens egenskaber, der bevirker at der kan være store tidsmæssige variationer i gaskoncentrationerne, dels de måleteknikker, der kan anvendes til at spore lossepladsgas, som medfører, at det er både økonomisk og teknisk muligt at opnå et meget stort data materiale.

Det overordnede formål med undersøgelserne for lossepladsgas er at skabe grundlag for en risikovurdering af, om gassen udgør en risici for mennesker eller miljø. I dette afsnit gives en kort sammenfatning af, hvad en gasundersøgelse bør omfatte og efter hvilken strategi undersøgelsen skal udføres. I Bilag 2 er givet en mere detaljeret beskrivelse af de enkelte delelementer, som indgår i en gasundersøgelse. Den strategi, der beskrives i dette afsnit og i bilag 2, er rettet mod at give grundlaget for, at der kan udføres en risikovurdering af lossepladsgas ud fra det risikovurderingskoncept, der er beskrevet i foregående afsnit.

Overordnet kan undersøgelser af lossepladsgas i lighed med andre miljøundersøgelser opdeles i 3 faser:

- Orienteringsfasen:
 - Dataindsamling omkring deponeringsforhold, geologi og arealanvendelse af lossepladsen og dens nærmeste omgivelser.
- Indledende feltundersøgelser:
 - Undersøgelser af det gasproducerende område.
 - Eventuelle undersøgelser ved bygninger som ligger tæt op til det gasproducerende område.
- Supplerende feltundersøgelser:
 - Uddybende undersøgelser af gasproduktionen.
 - Undersøgelser af gasspredningen, herunder gasfanens udbredelse, og undersøgelser af gaspermeabilitet.
 - Dataindsamling omkring byggetekniske forhold.
 - Byggeteknisk gennemgang og indendørsmålinger.

4.2 Orienteringsfasen

Første led i en gasundersøgelse er dataindsamlingen, hvor der tilvejebringes oplysninger om de parametre, der har betydning for gasproduktionen og gasmigrationen ud af lossepladsen. Udover at være et vigtigt led i planlægningen og udførelsen af gasundersøgelserne er de historiske oplysninger om lossepladsens opbygning og de geologiske og hydrogeologiske forhold et essentielt led i

forståelsen af lossepladsen og dermed i tolkningen af resultaterne af gasmålingerne.

Ved mange af de gasundersøgelser, der er udført i Danmark, har orienteringsfasen ofte været forholdsvist lavt prioriteret. Dette hænger bl.a. sammen med, at det ofte kan være meget besværligt om ikke umuligt at indhente brugbare oplysninger om deponeringsforholdene på lossepladserne. Et andet forhold, der spiller ind, er målemetoderne. Den fysiske del af en gasundersøgelse kan ofte foretages udelukkende ved hjælp af bærbare feltinstrumenter. Det er derfor økonomisk overkommeligt og hurtigt at skabe et stort datamateriale om gaskoncentrationerne i lossepladsen. En tolkning baseret udelukkende på baggrund af målte gaskoncentrationer kan dog give anledning til fejltolkninger.

Ved en gasundersøgelse foretages målinger af nedbrydnings-/affaldsprodukterne fra mikrobiologiske processer. I forhold til traditionelle jord- og grundvandsforureninger er ”forureninger” med lossepladsgas derfor meget dynamiske, og koncentrationerne af lossepladsgas kan variere meget både rumligt og over tid. Specielt i udkanten af lossepladsen og i ældre lossepladser vil gaskoncentrationen kunne variere fra meget lave koncentrationer til meget høje koncentrationer over få timer/dage.

4.2.1 Formål

Formålet med en orienterende fase er, at danne grundlag for en forståelse af hvordan lossepladsen er opbygget og for de geologiske og hydrogeologiske forhold omkring lossepladsen. Den orienterende fase har ligeledes til formål at skabe grundlag for en første vurdering af, om der kan være en gasrisiko ved lossepladsen, eller om de fysiske forhold omkring lossepladsen, f.eks. fyldens beskaffenhed eller afstanden til nærmeste bygning, er således, at der ikke er en gasrisiko.

4.2.2 Dataindsamling

De oplysninger, der kan indhentes, vil variere meget fra losseplads til losseplads, for nogle pladser vil det være muligt at indhente meget detaljerede oplysninger om lossepladsen, medens det for andre umiddelbart kun vil være muligt at få meget få oplysninger. Dataindsamlingen bør dog som minimum omfatte følgende forhold:

- Deponerede affaldstyper
- Deponerede affaldsmængder/fyldtykkelser
- Deponeringsperioder
- Lokal geologi og hydrogeologi
- Lossepladsens afdækning

I det omfang det er muligt, bør lossepladsens såvel tidsmæssige som rumlige udvikling belyses. Der bør desuden indhentes oplysninger om anvendelsen af lossepladsen og dens nærmeste omgivelser, herunder placering af bygninger m.v. hvor gassen kan ophobes, samt om underjordiske kabel- og ledningsanlæg.

Det er oftest formålstjenligt, at foretage en eller flere besigtigelser af lossepladsen og de omkringliggende områder, bl.a. af hensyn til at opnå en fornemmelse for lossepladsens størrelse og udformning samt af de topografiske forhold omkring lossepladsen. Besigtigelsen vil ligeledes give faktuelle oplysninger om f.eks. den nuværende arealanvendelse af området, og om der er tegn på vegetationsskader på området.

Besigtigelser af området vil desuden give oplysninger om adgangsforhold m.v. til brug for planlægningen af feltundersøgelserne.

Første risikovurdering

På baggrund af de indsamlede data foretages en første overordnet risikovurdering af gasrisikoen. Risikovurderingen foretages med henblik på at vurdere, om det er nødvendigt at foretage egentlige gasundersøgelser. Gasundersøgelser kan undværes, såfremt der er oplysninger om, at der ikke er deponeret bionedbrydeligt affald i lossepladsen, eller såfremt afstanden til de nærmeste bygninger er så stor, at det vurderes, at eventuelt udsivende gas ikke kan nå frem til bygningen, jf. bilag 2.

4.3 Indledende undersøgelse

Formålet med den indledende undersøgelse er at danne grundlag for en egentlig vurdering af gasrisikoen. Undersøgelsen skal være et supplement til orienteringsfasen, hvor de data, der er indsamlet, suppleres og uddybes.

Ved den indledende undersøgelse skal der foretages en geografiske afgrænsning af det gasproducerende område og en første vurdering af gasproduktionens størrelse. Undersøgelsen skal således kunne danne grundlag for vurdering af den første udgangshændelse i risikovurderingen "Lossepladsen producerer gas i skadelige/farlige koncentrationer/mængder".

Undersøgelsen skal desuden kunne anvendes til en overordnet vurdering af mulighederne for gasspredningen fra lossepladsen ved at belyse de geologiske, hydrogeologiske og topografiske forhold omkring lossepladsen. Desuden kan der foretages en beskrivelse af beliggenhed og anvendelsen af bygninger på lossepladsen og i lossepladsens nærområde, såfremt dette ikke er gjort i orienteringsfasen.

Den indledende undersøgelse kan opdeles i to dele, en geografisk screening af gas-koncentrationerne, hvor hele lossepladsens areal bliver dækket med målinger i de øvre fyldlag, og en efterfølgende fase, hvor der i udvalgte målinger foretages flere målrunder til belysning af gasvariationen over dybden i udvalgte punkter. Den indledende gasundersøgelse kan omfatte målinger af gasmigrationen uden for lossepladsen. Undersøgelser af gasmigrationen bør dog normalt foretages i forbindelse med en supplerende undersøgelse.

Specielt på ældre lossepladser, hvor der er en ringe gasproduktion, vil årtidsvariationer, meteorologiske forhold m.v. påvirke måleresultaterne. Der bør derfor som minimum udføres målinger 3 gange i hvert eneste målepunkt. Målerunderne bør fordeles, så både årtidsvariationer og forskellige vejsituationer bliver dækket af undersøgelsen. For idriftværende lossepladser vil gasproduktionen være så kraftig, at der kun sjældent vil kunne ses variationer i gasproduktionen på grund af ændringer i de atmosfæriske forhold eller årtidsvariationer.

I målepunkter, der er placeret uden for det gasproducerende område, vil variationerne i gaskoncentrationerne ofte være sammenfaldende med variationerne i atmosfæretrykket således at når trykket i atmosfæren falder, så stiger indholdet af lossepladsgas i borerne. Det er derfor vigtigt, at mindst én målrunde foretages i forbindelse med et fald i atmosfæretrykket. For at sikre dette kan det anbefales, at der foretages kontinuerte målinger i borer udenfor lossepladsen. Mange af de gasmålere, der anvendes i Danmark, har indbygget datalogger og kan ved en

simpel ombygning anvendes til kontinuerte målinger, hvor der f.eks. foretages målinger en gang i timen i 14 dage.

4.4 Supplerende gasundersøgelser

Omfanget og strategien for de supplerende gasundersøgelser vil naturligvis afhænge af de konkrete forhold ved hver enkelt losseplads.

På baggrund af de oplysninger, der er indsamlet i orireteringsfasen og ved den indledende undersøgelse, kan der foretages en risikovurdering som beskrevet i kapitel 3. For at foretage risikovurderingen vil det være nødvendigt, at foretage en række antagelser om nogle af de forhold, som ikke er belyst ved de udførte undersøgelser. Ud fra risikovurderingen er det derfor muligt, at pege på de faktorer, som er vigtigst at få yderligere belyst af hensyn til at forbedre risikovurderingen.

Formålet med de supplerende undersøgelser er således, at få afklaret de forhold, som risikovurderingen peger på er de vigtigste for vurderingen af gasrisikoen.

Overordnet set er de forhold som oftest skal belyses:

- Vurdering af gasmigrationen
- Vurdering af gasindtrængning i bygninger.

Vurdering og fastlæggelse af gasproduktionen kan også være en af de faktorer, der er væsentlig, specielt i lossepladser med meget lav gasproduktion.

I bilag 2 afsnit 4 er der givet en beskrivelse af de typer af undersøgelser, der kan udføres for at belyse de forhold der er beskrevet ovenfor.

5 Referencer

- /1/ Forprojektet. Risikovurdering ved gaslossepladser. Miljøstyrelsen, August 1998.
Projektet er udarbejdet i 1995 men publiceret i 1998.
- /2/ Miljøstyrelsen vejledning nr. 4, 1982. Vejledning i affaldsdeponering.
- /3/ Dakofa: Grundvandskontrol ved kontrollerede affaldsdeponier. Dakofa, Skrift nr. 1. 1985. Polyteknisk Forlag.
- /4/ Miljøstyrelsens vejledninger nr. 9, 1997. Affaldsdeponering
- /5/ Chhristensen, Thomas H. Affaldsteknologi, 1. udgave, 1. oplag. Teknisk Forlag 1998. ISBN 87-571-2148-6
- /6/ Risk assessment for methane and other gases from the ground. N. J. O'Riordan og C. J. Milloy. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Repot no. 152, 1995.
- /7/ Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification and Control. Frank P. Lees, Second Edition, United Kingdom 1996.
- /8/ Landfilling of Waste: Biogas. Edited by T. H. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann. First edition 1996. ISBN 0 419 19400 2
- /9/ Christophersen M. Lateral spredning og emission af gas fra en gammel losseplads. PhD afhandling. Instituttet for Miljøteknologi. 28 april 2000
- /10/ Miljøstyrelsens vejledninger nr. 6 og 7, 1998. Oprydning på forurenede lokaliteter
- /11/ Miljøstyrelsen: Miljøprojekt Nr. 112; Kvantitative og kvalitative kriterier for risikoaccept, 1989.

1 Indledning

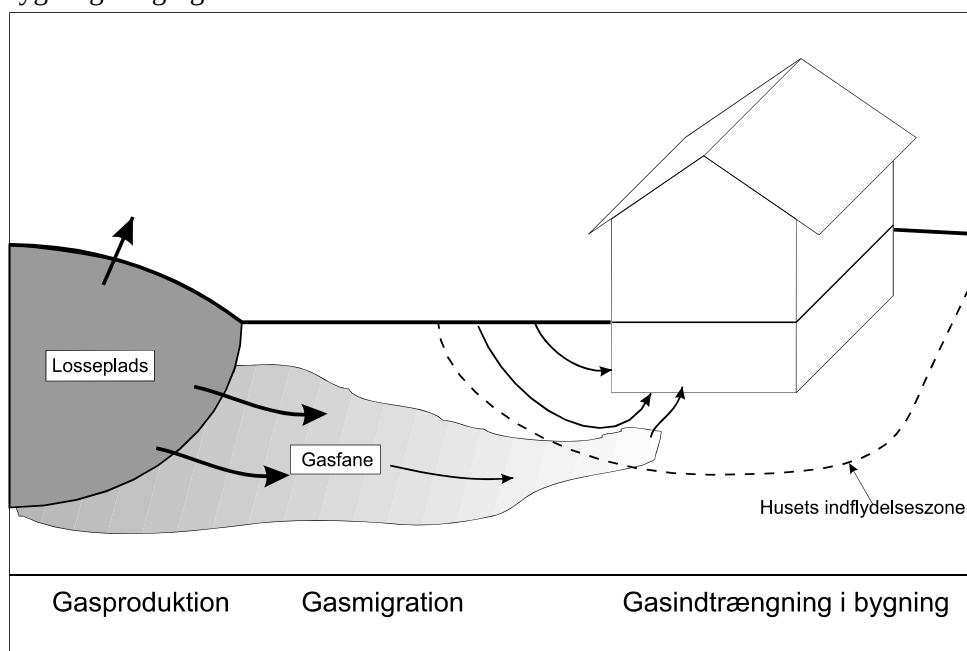
Lossepladsgas eller på nudansk deponigas er samlebetegnelsen for den komplekse sammensætning af gasser, der dannes under nedbrydningen af det organiske materiale i fyld og lossepladser. Hovedkomponenterne i lossepladsgas udgøres normalt af metan (CH_4) og kuldioxid (CO_2), og når ordet lossepladsgas anvendes i dagligtale, er det oftest metanen, der bliver refereret til. Lossepladsgas kan også indeholde høje koncentrationer af brint (H_2), og specielt i starten og slutningen af en losseplads/affaldscelles livscyklus vil lossepladsgassen kunne indeholde høje koncentrationer af kvælstof (N_2), som stammer fra atmosfærisk luft, der er trængt ned i fylden.

Gasproduktion

Produktionen af lossepladsgas bevirker, at der gennem hele lossepladsens aktive periode vil ske en større eller mindre gasemission fra lossepladsen. Gasemissionerne er således resultatet af de biologiske, kemiske og fysiske processer, der foregår i lossepladsen, og dermed af det miljø, der hersker i lossepladsen. Sammensætningen og omfanget af gasemissionerne vil afhænge af en række faktorer som bl.a. affaldets sammensætning og alder, lossepladsens fysiske udformning samt måden lossepladsen er drevet på, både under og efter affaldsdeponeringen har fundet sted.

Formål

Formålet med dette bilag er at give et indblik i den række af komplicerede processer, der har betydning både for gasproduktionen og for gassens spredning i miljøet, for derved at give en forståelse for de principper, der danner grundlaget i risikovurderingen af lossepladsgassens indtrængning i bygninger og lignende.



Figur 1.1 Illustration af faseopdelingen ved risikovurderingen

Læsevejledning

Dette bilag er opdelt i fire underbilag. Det første beskriver lossepladsgassen og dens fysisk-kemiske egenskaber, og herefter er der tre generelle teoriafsnit om gassens produktion og spredning i miljøet. De generelle teoriafsnit er opbygget, så de følger metodikken i risikovurderingen af lossepladsgas. I afsnit 3 beskrives gasproduktionen i selve lossepladsfylden og de faktorer, der har indflydelse på produktionens størrelse, og på i hvor høj grad den producerede gas vil migrere (sive) ud til omgivelserne. I afsnit 4 beskrives gasmigrationen mellem det sted, hvor gassen er produceret, og det sted hvor risikoen for brand, eksplosion m.v. kan opstå. I afsnit 5 beskrives gasindtrængningen i bygninger samt, hvordan gassen kan udgøre en risiko i en bygning.

Hvert underbilag er opbygget således, at bilaget indeholder beskrivelser af de faktorer, der er bestemmende for henholdsvis gasproduktionen, gasmigrationen eller gasindtrængningen. I slutningen af hvert bilag sammenfattes betragtningerne i relation til risikovurderingen.

Metan og kuldioxid

I lossepladser, der har modtaget organisk affald, vil den mikrobiologiske omsætning af organisk kulstof til metan og kuldioxid (eller på almindelig dansk forrådnelsesprocesserne i affaldet) være den vigtigste årsag til produktionen af lossepladsgas og til den flux af gas, som vil ske ud af fylden af såvel gassens hovedkomponenter som de sporstoffer, der vil findes i gassen. Sporstofferne vil dannes både på grund af mikrobiologiske processer og fysisk-kemiske processer.

I dette bilag vil forholdene omkring de metan- og kuldioxidproducerende processer blive beskrevet, medens indholdet og produktionen af sporgasser ikke vil blive behandlet yderligere. For informationer om sporgasser i lossepladsgas henvises bl.a. til Christensen et al 1996 /1/.

2 Fysisk-kemisk karakteristika af lossepladsgas

Hovedkomponenter Lossepladser, hvor der er deponeret bionedbrydeligt affald, vil producere lossepladsgas i flere årtier efter, at deponeringen er ophørt. Som det fremgår af kapitel 3.1 i dette bilag, vil lossepladsgassens hovedkomponenter metan (CH_4) og kuldioxid (CO_2) ofte tilsammen udgøre mere end 95 % af gasvolumenet med koncentrationer af metan på omkring 55 % v/v CH_4 og kuldioxid på ca. 45 % v/v CO_2 . De øvrige komponenter i lossepladsgassen udgør typisk mindre end 1 % v/v. Under visse forhold kan andre stoffer også forekomme i høje koncentrationer, f.eks. brint (H_2), kvælstof (N_2) og svovlbrinte (H_2S).

Lugt Både metan og kuldioxid er klare lugtfrie gasser, som derfor ikke umiddelbart kan detekteres af de menneskelige sanser. Den karakteristiske lugt af lossepladsgas stammer fra sporgasser som f.eks. flygtige fede syre og svovlholdige forbindelser. Mercaptaner er en gruppe af svovlholdige organiske stoffer, der specielt ved yngre lossepladser kan give anledning til kraftige lugtproblemer, hvor det er nødvendigt at fortynde stofferne op til 1 million (10^6) gange for at komme under lugtgrænsen /1/.

Densitet Kuldioxid, der er tungere end luft, har en relativ densitet i forhold til atmosfærisk luft på 1,53, medens metan, der er lettere end luft, har en relativ densitet i forhold til atmosfærisk luft på 0,55. Teoretisk set er lossepladsgas derfor lettere end atmosfærisk luft ved metankoncentrationer over 54 % v/v, og tungere end luft ved metankoncentrationer under 54 % v/v. Da lossepladsgas ofte har et højt vandindhold, er frisk lossepladsgas typisk tungere end luft.

Lossepladsgas, der har migreret gennem jorden, vil oftest have ændret sammensætning, bl.a. vil forholdet mellem metan og kuldioxid være ændret, ligesom vandindholdet vil være reduceret.

I tabel 2.1 er opstillet en række typiske værdier for de fysisk-kemiske egenskaber for hovedkomponenterne i losseplads og atmosfærisk luft.

Tabel 2.1 Typiske værdier for hovedkomponenterne i lossepladsgas og atmosfærisk luft. Værdierne gælder under standardforhold, dvs. 1 atm. tryk (= 1013 hPa), og 0°C (=273,15 Kelvin)

Gas	Densitet ρ (g/Nm ³)	Viskositet μ (N sek./m ²)	Diffusions koefficient luft D_0 (m ² /s)	Opløselighed (g/l)	Baggrundskoncentration atm. luft
CH_4	720	$11,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-5}$	0,025	0,00016 %
CO_2	1980	$14,7 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-5}$	1,69	0,03 %
N_2	1160	$17,6 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-5}$	0,018	78,08 %
O_2	1330	$14,7 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-5}$	0,036	20,95 %

Enheder I litteraturen anvendes ofte forskellige enheder for f.eks. tryk og koncentrationen jf. box 1.

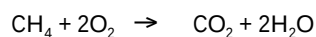
Tryk:	1 atm = 1013 hPa = $1,013 \times 10^5$ Pa = 1,013 bar = 760 mm Hg = 10 m H ₂ O
Koncentration:	1 % v/v = 1 vol.% = 10.000 ppm = 1 mol % (gælder kun for gasser)

2.1 Brandbare gasblandinger

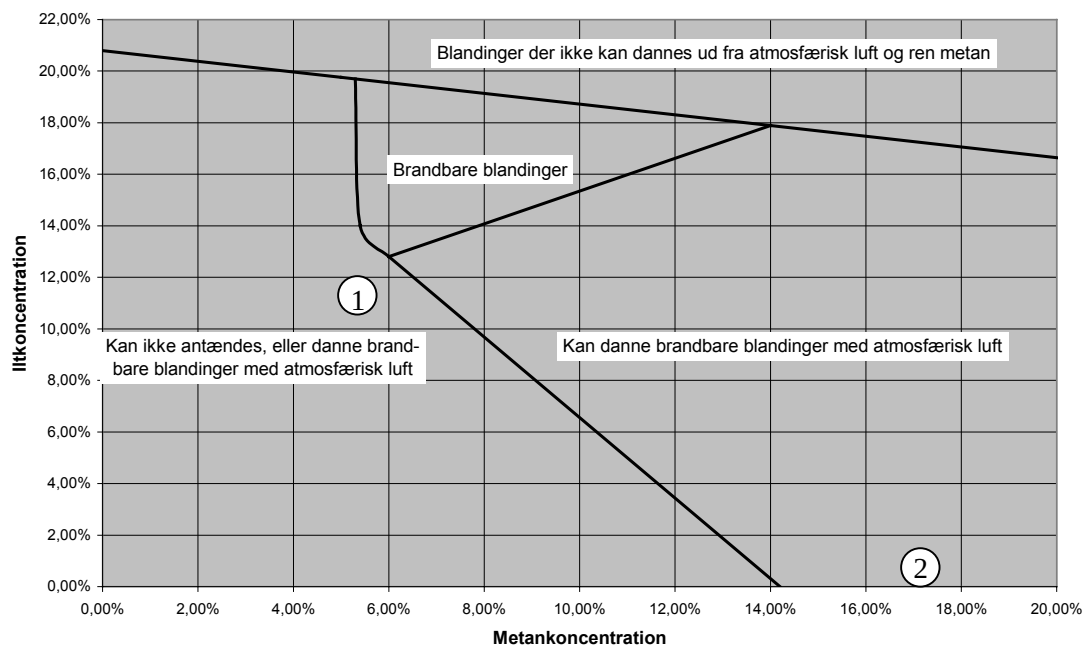
På grund af lossepladsens indhold af metan og andre brandbare gasser, vil lossepladsgas oftest være en brandbar gas. Antændelsen af brandbare metanblandinger vil i det åbne rum bevirke hurtig forbrænding af gasblandingen. I et lukket rum, hvor produkterne af forbrændingen ikke kan undslippe, vil forbrændingen på grund af den varmeudvikling, der sker ved branden, virke som en eksplosionsbrand. Oftest vil en sådan eksplosionsbrand kun blive omtalt som en gaseksplosion.

Som det fremgår af afsnit 3.1, vil lossepladsgassen være anaerob og indeholde væsentlige koncentrationer af metan under det meste af affaldscellen/lossepladsens livscyklus, også selvom der efter fase IV sker indtrængning af atmosfærisk luft i stigende mængder. Når atmosfærisk luft trænger ned i de øvre fyldlag, vil der opstå en blanding af metan og ilt i poreluften. Det er dog ekstremt sjældent, at man kan måle signifikante koncentrationer af både metan og ilt i poreluften. Dette skyldes, at metanoxiderende bakterier omsætter metan og ilt til kuldioxid efter ligningen vist i box 2. Reaktionen foregår normalt meget hurtigt og helt til ende, det vil sige til enten ilt eller metan er opbrugt.

Box 2 Metanoxidation



Da lossepladsgas, der indeholder metan, er helt iltfri, er det nødvendigt, at der sker en opblanding med atmosfærisk luft for, at der kan opstå brandbare gasblandinger. I figur 2.1 er indtegnet grænserne for, hvornår blandinger af metan i luft er brandbare (det trekantede område). Under normale trykforhold (1 atm) er metan brandbar i koncentrationer mellem 5,3 % og 14,0 % v/v CH₄. Grænserne for, hvornår blandingerne af metan er brandbar, øges en smule til mellem 5,0 og 15,0 % v/v CH₄, hvis sammenblandingen sker i et mindre lukket rum, som f.eks. hulrum i en bygning. Nedre eksplosionsgrænse (5,0 % v/v) kaldes LEL (Lower Explosion Limit) og øvre eksplosionsgrænse (15,0 % v/v) kaldes UEL (Upper Explosion Limit). I gasblandinger med høje koncentrationer af inerte gasser f.eks. N₂ og CO₂ vil spændet mellem LEL og UEL mindskes, jf. figur 2.1 (punkt 1). Antændelses- og eksplosionsgrænserne for lossepladsgas er ofte mere komplekse end vist i figur 2.1, idet lossepladsgas indeholder en lang række forskellige stoffer i varierende koncentrationer.



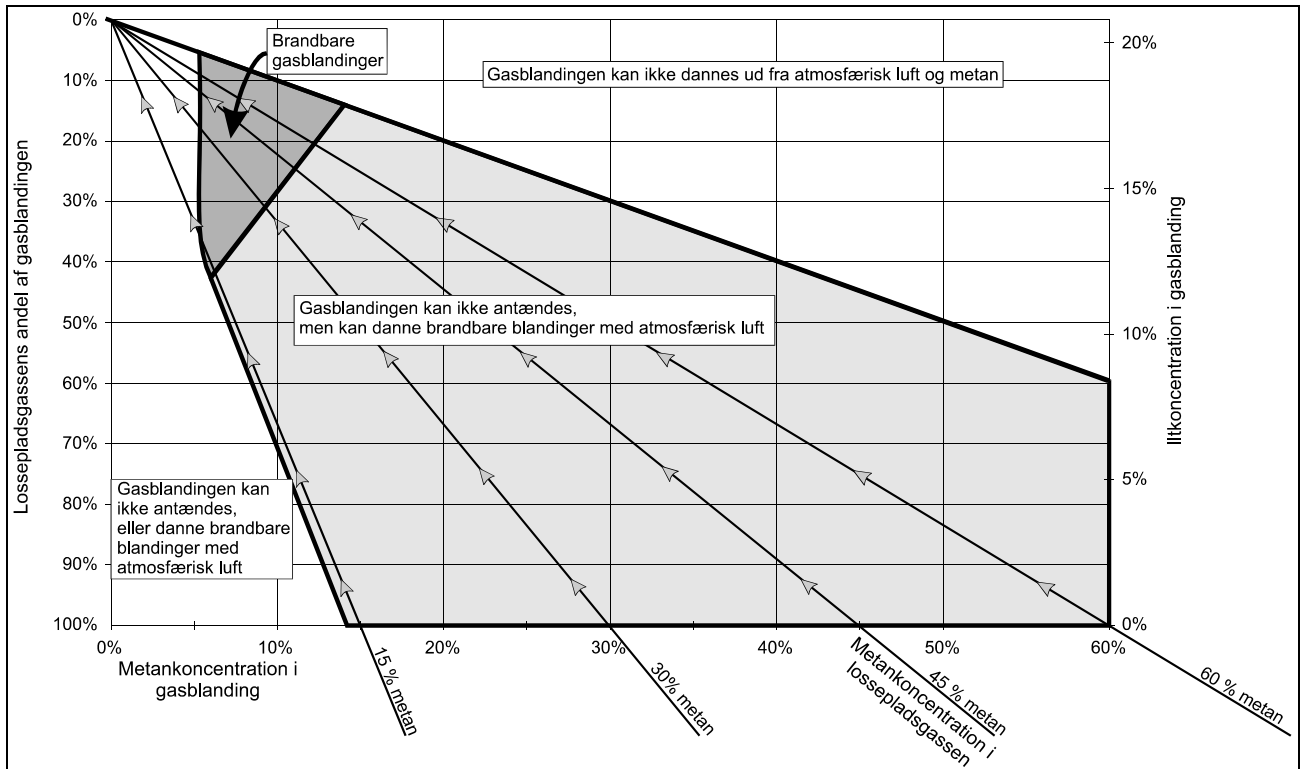
Figur 2.1 Forhold mellem gassammensætning og brandbarhed i en gasblanding af metan, nitrogen og atmosfærisk luft /1/.

For at en gasblanding skal være brandbar/eksplosiv, kræver det, at iltkoncentrationerne i gasblandingen er større end ca. 13 % v/v (punkt 1). Gasblandinger, der indeholder mindre end ca. 13 % v/v ilt, kan ikke antændes. Blandingerne kan dog muligvis blive brandbare, hvis der sker en yderligere opblanding med atmosfærisk luft, afhængig af metankoncentrationerne i blandingen. I figur 2.1 er indtegnet en ret linie mellem punkt 1 og punkt 2. Gasblandinger, hvis sammensætning ligger til højre for denne linie, kan ikke antændes, men de vil kunne danne brandbare blandinger ved en yderligere opblanding med atmosfærisk luft. Gasblandinger, der ligger til venstre for linien mellem punkterne 1 og 2, har så lave gaskoncentrationer, at de ikke vil kunne antændes, og de vil ikke kunne danne brandbare blandinger ved en yderligere opblanding med atmosfærisk luft.

For gasblandinger uden ilt skal koncentrationen af metan være større end ca. 14 v/v. % (punkt 2) for, at der kan opstå brandbare gasblandinger ved opblandingen med atmosfærisk luft. Opsivende lossepladsgas/poreluft vil derfor ikke kunne danne brandbare gasblandinger ved opblanding i atmosfærisk luft, hvis metankoncentrationen i poreluften er lavere end 14 % v/v (punkt 2). Specielt i forbindelse med ældre lossepladser og ved gasmigration fra nyere lossepladser er dette et vigtigt forhold at inddrage i risikovurderingen.

Da lossepladsgas er iltfri, vil iltindholdet i en gasblanding af atmosfærisk luft og lossepladsgas være afhængig af, hvor stor en andel den atmosfæriske luft udgør af gasblandingen, og dermed også af hvor stor en del af gasblandingen, som lossepladsgassen udgør. Iltindholdet i gasblandingen er derfor direkte proportional med blandingsforholdet mellem lossepladsgas og atmosfærisk luft. I figur 2.2 er derfor både iltkoncentrationen, og "den andel som lossepladsgassen udgør af gasblandingen" afbildet på Y-aksen, hvilket ikke umiddelbart ændrer figurens udseende. Årsagen til, at figur 2.2 ser anderledes ud, er, at X-aksen (metankoncentrationen) er forlænget fra 20 til 60 % v/v.

I figur 2.2 er desuden indtegnet isolinier for gasblandinger mellem atmosfærisk luft og lossepladsgas med forskellige gaskoncentrationer (15 %, 30 %, 45 % og 60 % v/v). Iso-linierne viser det fortyndingsforløb, som lossepladsgassen gennemgår ved fortynding med atmosfærisk luft. På figur 2.2 er det således muligt at aflæse metan- og iltkoncentrationerne i en gasblanding med et kendt blandingsforhold, og en kendt metankoncentration i lossepladsgassen.



Figur 2.2 Forholdet mellem lossepladsgassens andel af gasblandingen og brandbarheden af gasblandingen

Af figur 2.2 kan det ses, at en blanding af atmosfærisk luft og lossepladsgas med et indhold af 60 % v/v metan vil danne brandbare gasblandinger, når lossepladsgas udgør mellem ca. 8 og ca. 19 % af gasblandingen, medens lossepladsgas med et indhold af metan på 30 % v/v danner brandbare gasblandinger med atmosfærisk luft, hvis lossepladsgassen udgør mellem ca. 18 og ca. 32 % af gasblandingen.

2.2 Kuldioxid

Foruden risikoen for antændelse som beskrevet i forrige afsnit vil lossepladsgas i høje koncentrationer kunne udgøre en risiko for mennesker på grund af gassens høje indhold af kuldioxid og lave iltindhold.

Kuldioxid er en kvælende gas, der i høje koncentrationer kan være livstruende og i lavere koncentrationer kan give utilpashed og f.eks. synsforstyrrelser. Ved indånding af kuldioxid vil virkningen på mennesker være en jævn overgang mellem en simpel tilpasningsproces til toksiske reaktioner, som vil afhænge af det enkelte individ, og hvor længe påvirkningen varer. I tabel 2.2 er listet typiske påvirkninger ved forskellige koncentrationer af kuldioxid.

Tabel 2.2 Koncentrationsgrænser for kuldioxid

Koncentration	Virkning
9,0 %v/v (90.000 ppm)	Laveste dødelige koncentration for mennesker ved 5 minutters udsættelse, $LC_{50, 5M}$
1,5 % v/v (15.000 ppm)	Forslag til øvre grænse for langvarig eksponering / National Commission's Documentation of the Exposure Standards [NOHSC:10003(1995)]./
1,0 % v/v (10.000 ppm)	Bevidstløshed kan indtræffe.
0,5 % v/v (5.000 ppm)	Arbejdstilsynets grænseværdi

Koncentrationen af kuldioxid i ren luft er ca. 0,03 % v/v og i byluft 0,06 % v/v. I lukkede rum med mange mennesker som f.eks. biografer er der målt op til 0,25 % kuldioxid /30/. Lossepladsgas har typisk et indhold af kuldioxid på mellem 5 og 40 % v/v.

2.3 Betydning af gaskoncentrationer i bygning

Beregninger af forbrændingsprodukter og forbrændingstemperaturer viser, at der selv ved store luftoverskud vil kunne blive så varmt i et rum, at det kan være livstruende for mennesker. Beregningen viser, at hvis 10 % af et rum er fyldt med gas ved nedre eksplosionsgrænse, vil en forbrænding medføre en gennemsnitstemperatur i rummet på ca. 143 °C, medens der lokalt kan være væsentlig højere temperatur. I beregningen er der ikke taget hensyn til varmetab fra forbrændingsprodukterne til bygningen. Ved ulykken i Skellingsted (jf. bilag 5) var dødsårsagen netop forbrændinger, og undersøgelser af brandstedet tyder på, at rummet kun har været delvist fyldt med en brandbar blanding, idet der primært er sod langs panelerne.

Til sammenligning kan det anføres, at 120 °C vil kunne tolereres i ca. 15 minutter, 140 °C vil kunne tolereres i ca. 5 minutter /9/. 150 °C vil ikke være dødelig ved kortvarig påvirkning, men 126 °C og 150 °C vil give besvær med vejtrækning gennem næsen hhv. munden. På denne baggrund kan det ikke udelukkes, at der kan forekomme dødsfald i rum, hvor kun ca. 10 % af rummet er fyldt med lossepladsgas, som antændes ved LEL.

Fyldes ca. 30 % af et rum med lossepladsgas, vil der kunne forekomme kvælning pga. fortrængning af luftens ilt (iltkoncentration under 15 vol-%). Selvom der ikke er taget hensyn til samspillet med CO₂ og iltoptagelse, vurderes det ikke at være sandsynligt, at der ophobes så store gaskoncentrationer i et rum, medmindre selv naturlig ventilation er udelukket.

Mht. gener vurderes det ud fra foregående afsnit, at 0,5-1 % kuldioxid i rummet vil kunne give anledning til gener. Dette svarer til, at 1-2 % af rummet er fyldt med lossepladsgas. Denne vurdering er baseret på koncentrationen af kuldioxid. Det har ikke været muligt at finde oplysninger om gener pga. metan, og der er derfor heller ikke taget hensyn til en evt. samvirkning imellem gener pga. metan og kuldioxid.

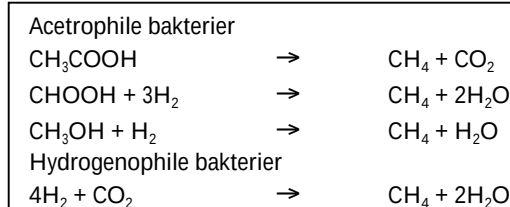
3 Gasproduktion

3.1 Metanproduktion

Hovedparten af affaldet vil hurtigt efter deponeringen blive anaerobt som følge af de mikrobiologiske processer, der nedbryder affaldet. Ved anaerobe forhold vil de mikrobiologiske processer oftest resultere i, at det faste organiske kulstof vil blive omdannet til kuldioxid (CO_2) og metan (CH_4). Omdannelsen af det organiske kulstof i affaldet til metan er dog en kompleks proces, der omfatter flere forskellige omdannelsesprocesser af det organiske materiale.

De mikroorganismer, der producerer metan, kan kun omdanne meget simple organiske stoffer som f.eks. eddikesyre og metanol (acetrophile bakterier), eller ved omdannelse af brint (H_2) og kuldioxid (hydrogenophile bakterier) jf. box 3. Det er derfor nødvendigt, at andre grupper af mikroorganismer først omdanner de mere komplekse stoffer, som affaldet består af, til de simple organiske stoffer eller brint, for at det er muligt, at omdanne det organiske kulstof til metan. For en detaljeret beskrivelse af kulstofomsætningen henvises til Christensen et al. 1996 /1/.

Box 3 Eksempler på kemiske reaktioner



De mikrobielle processers indflydelse på lossepladsgassens sammensætning er vist i figur 2.1 for en homogen celle i en losseplads. Nedbrydningsprocesserne i affaldet, fra det er deponeret, til det til slut er stabiliseret, kan idealiseret set opdeles i 8 faser /1/. Hver fase har sin karakteristiske gassammensætning. Længden af faserne i figur 2.1 afspejler ikke varigheden af de enkelte faser. De første faser er forholdsvis kortvarige (dage, uger og evt. måneder), medens de sidste faser har en længere tidshorisont (år eller årtier).

Fase I Den aerobe fase

En kort aerob fase, hvor ilten i poreluften opbruges ved omsætning af letnedbrydelige organiske stoffer under dannelse af kuldioxid. Den aerobe fase er normalt forholdsvis kort (dage/uger).

Fase II Den syreproducerende fase

Fermentative og syreproducerende mikroorganismer producerer flygtige fede syrer, kuldioxid og brint under anaerobe forhold. Produktionen af kuldioxid og brint vil fortrænge kvælstof (N_2) fra poreluften. Den syreproducerende fase er oftest af kort varighed

(uger/måneder). Under særlig forhold, hvor pH-værdien i affaldet er lav, vil denne fase have en længere varighed, idet de metanproducerende bakterier hæmmes ved lave pH-værdier.

Fase III *Indledende metanogene fase*

I den anden anaerobe fase begynder de metanogene bakterier at vokse og producere metan, og koncentrationerne af kuldioxid og brint falder. Denne fase er oftest forholdsvis kortvarig ligesom de to første faser.

Fase IV *Den stabile metanogene fase*

Den stabile metanogene fase er karakteriseret ved koncentrationer af metan på 55 ± 5 % v/v og koncentrationerne af kuldioxid på 45 ± 5 % v/v samt lave koncentrationer af brint. Fasen er normalt forholdsvis lang (år/årtier).

Fase V *Luft indtrængningsfase*

Atmosfærisk luft begynder at trænge ned i det øvre fyldlag, hvorved metanproduktionen reduceres. Den lavere gasproduktion fører til, at udvaskningen af kuldioxid får en relativt større betydning. Udvasningen/opløsningen af kuldioxid bevirker, at koncentrationerne af metan i poreluften bliver højere. Fasen er normalt forholdsvis lang (år/årtier).

Fase VI *Metanoxiderationsfase*

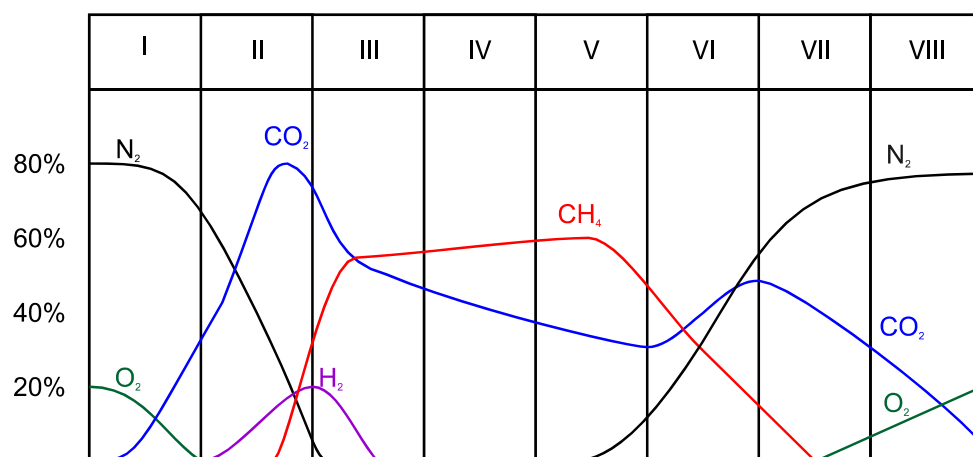
Den metan, der produceres i den centrale del af affaldet, oxideres til kuldioxid, når den migrerer ud igennem de yderste affaldslag. Kvælstof er nu til stede i signifikante koncentrationer i poreluften. Fasen er normalt forholdsvis lang (år/årtier).

Fase VII *Kuldioxidfase*

Metanproduktionen er nu neglignel, og indtrængen af atmosfærisk luft skaber et semi-aerobt miljø, hvor det organiske kulstof oxideres til kuldioxid, ligesom reducerede uorganiske forbindelser oxideres. Fasen er normalt lang (årtier).

Fase VIII *Jordluffaset*

Omsætningsraterne i fylden er nu lige så lave som dem, der ses i jordlag med biologisk aktivitet, og lossepladsgassen ligner poreluft i jorden.



Figur 3.1 Idealiseret fremstilling af udviklingen i gassammensætningen i en affaldscelle opdelt i 8 faser /1/.

De i figur 3.2 tegnede udviklinger i gaskoncentrationen gælder for en idealiseret homogen affaldscelle. I virkelige affaldsceller vil forskellige dele af affaldet kunne være i forskellige faser, og gassammensætningen kan derfor være et miks af forskellige faser. Da cellerne i en losseplads oftest fyldes op over en længere periode (måneder/år), vil de første faser (I-III) ofte være svære at identificere, fordi de forskellige dele af cellen vil være i forskellige faser. De senere faser er så lange, at forskellen i deponeringstidspunktet får mindre betydning, men den fysiske udformning af lossepladsen, affaldets sammensætning, samt driften af lossepladsen vil bevirke, at forskellige dele af affaldet vil være i forskellige faser.

Idriftværende lossepladser

Gassammensætningen i de idriftværende affaldsdeponeringsanlæg vil typisk være som i fase IV, med metankoncentrationer omkring 55 % v/v CH₄ og kuldioxidkoncentrationer på ca. 45 % v/v CO₂. Typisk vil CH₄/CO₂-forholdet ligge på mellem 1,2 og 1,5. På grund af gasproduktionens størrelse og den kompaktering, der har foregået af affaldet, vil der oftest være et væsentligt overtryk i poreluften i forhold til atmosfæretrykket, i størrelsesordenen 10 - 300 Pa. Den biologiske omsætning vil bevirke, at der sker en opvarmning af fylden, hvilket tydeligt vil kunne observeres f.eks. i forbindelse med borearbejde.

Lukkede lossepladser

I de ældre lukkede lossepladser (der tidligere blev kaldt affaldsdepoter), hvor opfyldningen oftest er sket før midten af 1970'erne, vil gassammensætningen typisk være som i de sidste faser (V-VII). I den centrale del af lossepladsen og/eller i de dybere liggende fyldlag vil affaldet være metanproducerende, mens de øverste fyldlag er aerobe eller semi-aerobe på grund af indtrængende atmosfærisk luft, der blandes med opsivende lossepladsgas. I de øvre fyldlag vil koncentrationen af metan derfor være lav, eller der vil være helt metanfrit, og kuldioxidkoncentrationer vil oftest være høje (5-30 % v/v CO₂). I fase V vil der i den centrale del af fylden herske anaerobe forhold med høje metan koncentrationer (30-70 % v/v CH₄) og moderate kuldioxid koncentrationer (20-30 % v/v CO₂), oftest med et CH₄/CO₂-forhold på mere end 2. I fase VI vil metankoncentrationerne i den centrale del af fylden være lavere, ca. 5 - 40 % v/v CH₄. Forholdet mellem CH₄ og CO₂ vil kunne variere en del, idet der vil foregå udvaskning af den kuldioxid, der er dannet under omsætningen af det organiske materiale i fylden, samtidigt med at der i yderkanten af den

anaerobe zone bliver dannet kuldioxid ved oxidation af metan. I fase VII vil der kun sporadisk kunne måles metankoncentrationer i fylden, selvom der i hovedparten af fylden vil kunne måles anaerobe forhold.

På grund af den forholdsvis ringe gasproduktion, der foregår i de ældre lukkede lossepladser, vil der sjældent kunne måles noget signifikant overtryk i poreluften, ligesom der sjældent vil kunne observeres nogen opvarmning af fylden.

3.1.1 Faktorer, der influerer på gasproduktionen

De mange forskellige typer affald, der deponeres på lossepladsen, variationen i det organiske stofs nedbrydelighed og affaldscellens inhomogenitet, giver lossepladsen et meget varierende og uensartet men også ineffektivt økosystem. De gasproducerende processer, der foregår ved nedbrydningen af et givet organisk materiale, vil være afhængig af det lokale miljø, som nedbrydningen foregår under, og dermed af en række ikke-biologiske faktorer som ilt og brint koncentrationer, pH, alkalinitet, næringsstoffer, inhibitorer, temperatur og vandindhold. Disse faktorerers indflydelse på gasproduktionen vil blive kort beskrevet i dette afsnit.

Ilt	Iltfrie forhold er essentielt for, at de anaerobe bakterier kan vokse og omdanne det faste organiske materiale til metan og kuldioxid. Specielt er de metanogene bakterier strikt anaerobe og kræver meget lave redoxpotentialer (under -330 mV) /1/. Hvis atmosfærisk luft og dermed ilt trænger ned i lossepladsen, vil metanproduktionen øjeblikkeligt ophøre i de dele af fylden, der bliver aerobe. Metanproduktionen vil dog hurtigt blive genoptaget, når der igen indtræder anaerobe forhold i fylden.
Vandindhold	I lighed med andre forrådnelsesprocesser har vandindholdet stor betydning for gasproduktionen. Således er et lavt vandindhold ofte en begrænsende faktor for gasproduktionen, specielt i de ældre fyld- og lossepladser. Da gaskoncentrationerne oftest måles i poreluften, er det en udbredt misforståelse, at gasproduktionen også udelukkende foregår i den umættede zone. Specielt i de ældre lossepladser er det dog ofte tydeligt, at den største mikrobielle aktivitet og dermed gasproduktion foregår i den vandmættede del af fylden og i fylden lige over grundvandsspejlet, hvor de kapillære kræfter bevirker, at fylden har et højere vandindhold. Det høje vandindhold har flere gavnlige effekter på gasproduktionen, bl.a. ved at sikre en effektiv udveksling af substrat, næringsstoffer, buffere og mikroorganismer mellem de lokale miljøer i fylden. Vandet vil ligeledes kunne fortynde eventuelle inhibitorer. Specielt i de ældre fyld- og lossepladser vil et højt vandindhold desuden være en effektiv hindring mod indtrængning af ilt, hvorved det anaerobe miljø kan opretholdes.
Brint	Brint (hydrogen) produceres både af de fermentative bakterier og de syreproducerende bakterier. Ved lave brintkoncentrationer (brintræk) vil der dannes brint, kuldioxid og eddikesyre under nedbrydningen af det organiske stof, men ved høje brintkoncentrationer dannes ethanol, butylsyre og propionsyre i stedet for eddikesyren. Disse stoffer kan nedbrydes yderligere, men ved høje brintkoncentrationer opkoncentreres stofferne, hvilket kan bevirke, at der sker en akkumulering af organiske syrer og en sænkning af pH.

pH og alkalinitet	Produktionen af metan sker mest effektivt i pH-intervallet fra 6 til 8, og de metanproducerende bakterier er mere pH følsomme end mange af de øvrige bakteriegrupper. Det metanproducerende økosystem er et følsomt system, hvor et afbalanceret forhold mellem de forskellige grupper af bakterier er nødvendigt for en god metanproduktion. Hvis systemet stresses, vil der som beskrevet ovenfor ske en opkoncentrering af organiske syrer og en reduktion i pH. Dette bevirker, at metanproduktionen falder, hvorved pH sænkes yderligere. Slutteligt vil metanproduktionen eventuelt stoppe helt.
Sulfat	Laboratorieforsøg har vist, at metanproduktionen falder drastisk, hvis der er høje koncentrationer af sulfat i fylden. Dette skyldes ikke, at sulfat har en toksisk effekt på de metanproducerende bakterier, men en simpel substratkonkurrence mellem de metanproducerende bakterier og de sulfatreducerende bakterier. De sulfatreducerende bakterier og de metanproducerende bakterier er to grupper af bakterier, der begge omsætter eddikesyre og brint, og da de sulfatreducerende processer energimæssig set er bedre, favoriseres de sulfatreducerende bakterier. De sulfatreducerende bakterier er ydermere mere robuste end de metan producerende bakterier, idet de bl.a. kan "arbejde" inden for et pH-interval fra mindre end 5 til 9.
Næringsstoffer	Som andre økosystemer har det anaerobe økosystem udover substrat også brug for næringsstoffer som kvælstof og fosfor og mikronæringsstoffer som calcium, magnesium, kobber, kobolt, molybdæn og selen. Både næringsstofferne og mikronæringsstofferne er normalt tilstede i fylden i tilstrækkelige mængder, hvorfor mangel på næringsstoffer sjældent er den begrænsende faktor for gasproduktionen i en losseplads med blandet affaldssamsetning.
Inhibitorer	Metanproduktionen er forholdsvis sensitivt overfor inhibitorer. De vigtigste er allerede nævnt, ilt, brint, pH og sulfat, men metankoncentrationen kan også hæmmes af høje koncentrationer af makro-ioner som natrium, kalium, calcium og magnesium eller af specifikke organiske stoffer. Koncentrationerne af makro-ioner eller specifikke organiske stoffer er dog yderst sjældent så høje i lossepladserne, at der kan observeres en hæmning af metanproduktionen.
Temperatur	Som andre mikrobielle processer er metanproduktionen påvirket af temperaturen. I laboratorieforsøg er det vist, at metanproduktionsraten stiger drastisk (op til 100 gange), når temperaturen hæves fra 20 til 40 °C /1/. De anaerobe processer producerer mindre varme end de aerobe processer.

3.2 Gasproduktionsrater

Som nævnt i foregående afsnit vil der være en række faktorer, som har indflydelse på gasproduktionen. Disse faktorer har ikke bare indflydelse på gassens kvalitet, men i høj grad også på kvantiteten af gassen, eller med andre ord på mængden af gas, der produceres. Kendskabet til gasproduktionsraterne og variationen over tid er et meget vigtigt element i risikovurderingen af lossepladsgas. I litteraturen er der meget få data om den totale gasproduktion og endnu færre data om gasproduktionens variation over tiden. Dette skyldes bl.a., at det praktisk talt er umuligt at måle de totale gasproduktionsrater fra en hel losseplads eller en lossepladscelle, såvel ved et enkelt givent tidspunkt eller over en længere periode. Til bestemmelse af gasproduktionen er det derfor nødvendigt at basere sine data på målingerne foretaget ved

småskala forsøg i laboratoriet, ved feltobservationer som f.eks. ventilationstest eller ved teoretiske modelberegninger.

Totale gasproduktion Affaldets indhold af bionedbrydeligt materiale har naturligvis indflydelse på den totale mængde gas, der kan produceres pr. tons eller m³ affald. Det er specielt affaldets indhold af let nedbrydelige stoffer, som proteiner, fedt og kulhydrater herunder cellulose, der har betydning for gasproduktionen, medens svært nedbrydelige stoffer som lignin og plastik, kun giver et ringe bidrag til gasproduktionen. Nedbrydningen af cellulose til metan og kuldioxid giver ca. 800 m³ gas pr ton cellulose ved total nedbrydning /4/. Nedbrydningen af affald giver dog ringere gasproduktion, dels fordi der ikke sker en total nedbrydning af affaldet, dels fordi affaldet indeholder inerte stoffer, der ikke nedbrydes. Blandt andet i /1/ og /2/ er der sammenstillet nogle af de data, der findes i litteraturen om størrelser af gasproduktionen for forskellige affalds-sammensætninger, jf. tabel 3.1. I Miljøstyrelsens vejledning nr.7, 1998 er der nævnt produktionsrater for danske lossepladser på mellem 180 og 210 Nm³/t affald.

Tabel 3.1 Totale gasproduktion i forskellige affaldstyper. Metanproduktionen vil typisk udgøre mellem 50 og 60% af den totale gasproduktion

Affaldstype	Gasproduktion /1/ (Nm ³ gas/t tørt affald)	Gasproduktion /2/ (Nm ³ gas/t tørt affald)
Dagrenovation	50-400	25-450
Industriaffald		156
Papir/pap	65-240	
Græs	176	415
Haveaffald	60	
Slam fra renseanlæg		500

I nogle dele af litteraturen f.eks. /4/ gives produktionen i g CH₄ pr. kg tørt affald. Da produktionen af metan typisk vil udgøre mellem 50 og 60 % af den totale anaerobe gasproduktion, kan gasproduktionen angivet i "g CH₄" omregnes til "Nm³ lossepladsgas" ved at dividere gasproduktionen (angivet i g CH₄) med densiteten af metan (720 g/m³) og med metankoncentrationen (55 %).

Gasproduktionsrater At forudsige gasproduktionsraten over tiden er endnu sværere end at bestemme den totale gasproduktion. For de fleste lossepladser vil den overordnede gasproduktion dog følge det samme mønster. I de første år efter affaldet er deponeret, vil gasproduktionen stige. Nogle år efter deponeringen er afsluttet, vil gasproduktionen toppe, hvorefter gasproduktionsraten vil være faldende.

I litteraturen findes en række modeller til beskrivelse af gasproduktionen. I de fleste modeller beskrives gasproduktionsraten efter en 1. ordens eksponentiel funktion:

$$(3.1) \quad P_t = P_{\text{tot}}(1 - e^{-kt}),$$

hvor: P_t er summen af produceret gas til tiden t (Nm³/tons affald)
 P_{tot} er den totale gasproduktion (Nm³/tons affald)
 k er nedbrydningskonstant hvor $k = \ln 2 / t_{1/2}$
 $t_{1/2}$ er halveringstiden
Nm³ er nomalkubikmeter, dvs. under standard temperatur og tryk

Blandt andet i Miljøstyrelsens vejledning nr. 7, 1998 /5/ foreslås gasproduktionsraten beskrevet efter en 1. ordens eksponentiel funktion.

$$(3.2) \quad G_t = P_{\text{tot}} k e^{-kt},$$

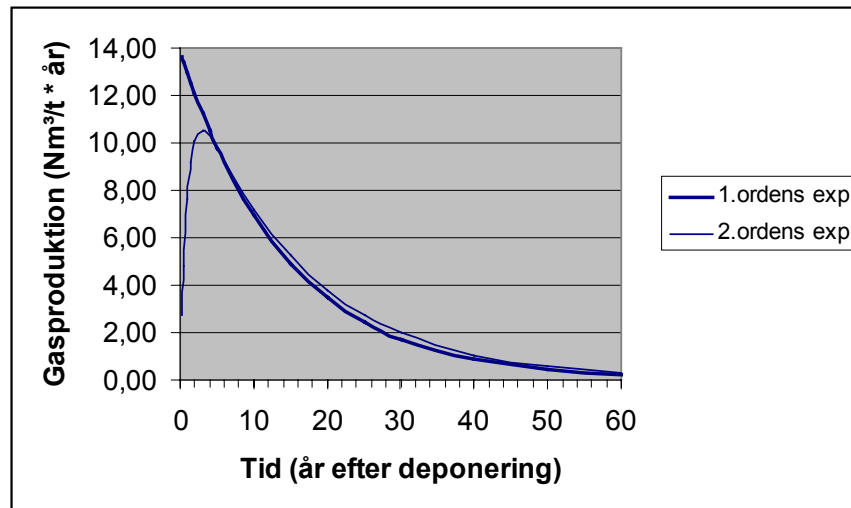
hvor: G_t er gasproduktionsraten til tiden t (Nm³/tons affald pr. år)

Som nævnt er den totale gasproduktion P_{tot} hovedsageligt afhængig af affaldsmængden og affaldets sammensætning/bionedbrydelighed, medens halveringstiden ($t_{1/2}$) vil være afhængig af den lange række af faktorer, der er nævnt i forrige afsnit. En af de vigtigste faktorer er affaldets fugtighed. I CIRIA 152 /2/ er der foreslået de i tabel 3.2 givne halveringstider.

Tabel 3.2 Halveringstider for dagrenovation som funktion af vandindhold og nedbrydelighed /2/

Vandindhold i affaldet	Halveringstid (år)		
	Hurtig	Medium	Langsom
Tør	10	15	25
Standard	5	10	20
Våd	1	5	15

Beskrivelsen af gasproduktionsraterne efter en 1. ordens eksponentiel funktion er speciel velegnet for de ældre lossepladser, hvor det er mere end 10 -15 år siden affaldsdeponeringen ophørte. Ligningen (3.2) tager udgangspunkt i, at gasproduktionen har sit maksimum til tiden $t = 0$, dvs. deponeringstidspunktet. Dette er imidlertid ikke helt korrekt, idet gasproduktionen først topper nogle år efter, at deponeringen er foretaget. For nyere lossepladser eller lossepladser, der stadig er i drift, er det derfor nødvendigt, at opdele beskrivelsen af gasproduktionsraterne i to trin, ét der beskriver gasproduktionen frem til tidspunktet med maksimal gasproduktion, og ét der beskriver den efterfølgende aftagende gasproduktion. I Christensen et al. 1996 /1/ er der beskrevet en række modeller, der kan beskrive denne to trins deling af gasproduktionsraterne. Hovedparten af modellerne beskriver den sidste del som en 1. ordens eksponentiel funktion, der er lineært forskudt til det tidspunkt, hvor der er maksimal gasproduktion ($t = t_0$). Den første del frem til den maksimale gasproduktion beskrives simplest ved en lineær stigning i gasproduktionen eller en 1. ordens eksponentiel funktion. I /1/ beskrives også en model, hvor begge faser beskrives i ligning (3.3).



Figur 3.2 Udviklingen i gasproduktionen efter henholdsvis en 1. ordens og 2. ordens eksponentiel funktion. efter ligning (3.2) og (3.3), hvor der ved ligning (3.2) er anvendt en total gasproduktion på 200 Nm³/tons og en halveringstid på 10 år

$$(3.3) \quad G_t = A(1 - e^{-(t/k_1)})e^{-(t/k_2)},$$

hvor: G_t er gasproduktionsraten til tiden t (Nm³/tons affald pr. år)
 A er den maksimale gasproduktion = 13,61 (Nm³/t affald pr. år)
 k er koefficienter, $k_1 = 1,1$ år og $k_2 = 15,72$ år.

Ved beskrivelsen af gasproduktionen under selve deponeringsperioden er det også nødvendigt at tage højde for, at deponeringen ikke sker på én gang men over en længere periode, og at mængden af affald er stigende under hele deponeringsperioden.

BOD₅/COD

To af de parametre, der ofte indgår i et kontrolprogram for perkolatet fra lossepladser, er det biologiske iltforbrug (BI₅ eller BOD) og det kemiske iltforbrug (COD). Det biologiske iltforbrug er et udtryk for indholdet af bionedbrydelige stoffer i perkolatet, medens det kemiske iltforbrug er et udtryk for den totale omsætning af organisk materiale, både de let nedbrydelige og de svært nedbrydelige stoffer, samt af de herskende redox-forhold. Forholdet mellem BOD og COD giver derfor et udtryk for hvor stor en del af det organiske stof, der er let omsætteligt, og dermed hvor stort et potentiale der er for gasproduktion.

I lossepladsens første faser (fase I- IV) vil indholdet af let nedbrydelige stoffer være højt, og BOD/COD forholdet vil ofte være større end 0,4. Det høje indhold af letnedbrydelige stoffer giver mulighed for en høj metanproduktion. Dette kræver dog, at lossepladsen er ude af den syreproducerende fase (fase II) og at pH værdierne er stabiliseret (pH>6,5). Perkolatet fra en losseplads i fase IV (den stabile metanogene fase) er således ofte kendetegnet ved højt BOD/COD forhold (> 0,4) og neutrale pH-værdier (>6,5).

Efterhånden vil indholdet af let nedbrydelige stoffer falde, hvorfor BOD/COD forholdet ligeledes falder. Metanproduktionen vil ligeledes falde og lossepladsen vil overgå til faserne V (luft indtrængningsfasen) og fase VI (metanoxideringsfasen). Perkolatet fra en losseplads i fase V eller IV er således ofte kendetegnet ved lavt BOD/COD forhold (< 0,1), og i det hele

taget lave indhold af organiske stoffer. Perkolatets pH-værdier vil i disse faser normalt være forholdsvis konstant, omkring $\text{pH} = 7,5$.

3.2.1 Variationer i gasproduktionen

Som det er omtalt tidligere, vil produktionen af metan afhængig af en række faktorer, og metanproduktionen vil derfor ikke kun variere over tiden, men der vil også være store variationer i gasproduktionen i fylden inden for den samme affaldscelle. De gasproduktionsrater, der beregnes ved de teoretiske modeller, skal derfor betragtes som gennemsnitsrater, der vil dække over store variationer. Specielt i de ældre lossepladser vil forskellen i gasproduktionen i de forskellige dele af fylden være tydelig. I store dele af pladsen vil gasproduktionen være meget ringe og ofte neglignel, medens gasproduktionen i den centrale del af fylden vil være væsentlig over den beregnede gennemsnitlige gasproduktion.

3.3 Vurdering af gasproduktionen

En samlet vurdering af, hvorvidt lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer, bør foretages ud fra en samlet vurdering af den gasproduktionsrate og de gaskoncentrationer, gasproduktionen resulterer i. I det følgende er vurderingen af gasproduktionen foretaget ud fra de 8 faser, som er defineret i afsnit 3.1.

Fase I til III er korte faser (dage-måneder), som ofte vil være svære at identificere, hvorfor gasproduktionen i disse faser ikke vil blive vurderet.

Fase IV Den stabile metanogene fase, er kendetegnet ved høje gaskoncentrationer og høje gasproduktionsrater, som dog er faldende sidst i fasen. I fase IV vurderes det, at skadelige/farlige koncentrationer altid forekommer.

Fase V Luft indtrængningsfasen, er kendetegnet ved høje koncentrationer af lossepladsgas, og forholdsvis lav gasproduktion. I fase V vurderes det, at skadelige/farlige koncentrationer næsten altid forekommer.

Fase VI Metanoxideringsfasen. I denne fase er koncentrationen af lossepladsgas faldende, der vil forekomme områder i lossepladsen, hvor der sjældent eller aldrig forekommer metan, og andre områder af lossepladsen hvor der stadig er høje koncentrationer af lossepladsgas. I fase VI vurderes det, at skadelige/farlige koncentrationer forekommer med mindre sandsynlighed end i de to foregående faser. Det stadig er muligt, at der forekommer skadelige koncentrationer af lossepladsgas.

I lossepladser, hvor områderne med høje koncentrationer af losseplads kun forekommer i de dybere liggende fyldlag og/eller, hvor områderne kun har et meget begrænset omfang (lossepladser der er i slutningen af fase VI), vurderes det, at der kun sjældent kan forekomme skadelige koncentrationer af lossepladsgas.

Fase VII Kuldioxidfase. Her er omfanget af gasproduktionen yderst begrænset, og begrænser sig til en lille del af lossepladsen. I den første del af fasen kan der stadig forekomme metankoncentrationer i fylden, men metankoncentrationerne er forholdsvis lave. Fase VII vurderes kun i yderst sjældne tilfælde at kunne give anledning til skadelige koncentrationer af lossepladsgas.

Fase VII Jordluftfase, I denne fase er metanproduktionen ophørt. Denne fase vurderes derfor ikke at kunne give anledning til skadelige koncentrationer af lossepladsgas.

3.3.1 Lossepladsens størrelse

I en samlet vurdering af gasproduktionen er det også nødvendigt at inddrage lossepladsens størrelse, idet gasproduktionsraterne angives pr. tons affald.

Ved risikovurderingen af lossepladsgas vil det ofte kun være en lille del af den gas, der produceres i lossepladsen, der reelt er årsag til en konkret risiko. I det omfang at den mængde gas, der dannes i lossepladsen (Q_{dannes}), er væsentligt større end den gasmængde, der skal til for at give et skade et uheldsforløb (Q_{uheld}), vil lossepladsens størrelse være uden betydning.

Den mængde af gas, der er nødvendig for at et uheld f.eks. en gasekspllosion skal ske, er forholdsvis beskeden. For uheldsscenarier, hvor uheldet sker i bygninger eller bygværker på selve lossepladsen, vil mængden af gas, der skal til for at skabe uheldet, (Q_{uheld}) være væsentligt mindre end den mængde poreluft, der er i fylden. Såfremt der sker gasproduktion i fylden under en bygning/et bygværk, vil størrelsen af lossepladsen derfor i praksis være uden betydning for risikoen for et uheld.

For uhelds scenarier, hvor uheldet sker i bygninger eller bygværker, der ligger uden for selve lossepladsen, vil det være nødvendigt, at der sker en horisontal gasmigration fra lossepladsen og ud til bygningen/bygværket. For at gasmigrationen skal kunne bevirke, at der sker et uheld, skal gasmængde, der migrerer ($Q_{\text{migration}}$), være væsentlig større end den mængde gas, der skal til for at skabe uheldet, idet kun en brøkdel af den gas der migrerer vil sive ind i bygningen/bygværket. Da det kun er en del af den gas, der produceres, der vil bevirke, at der sker en gasmigration, vil:

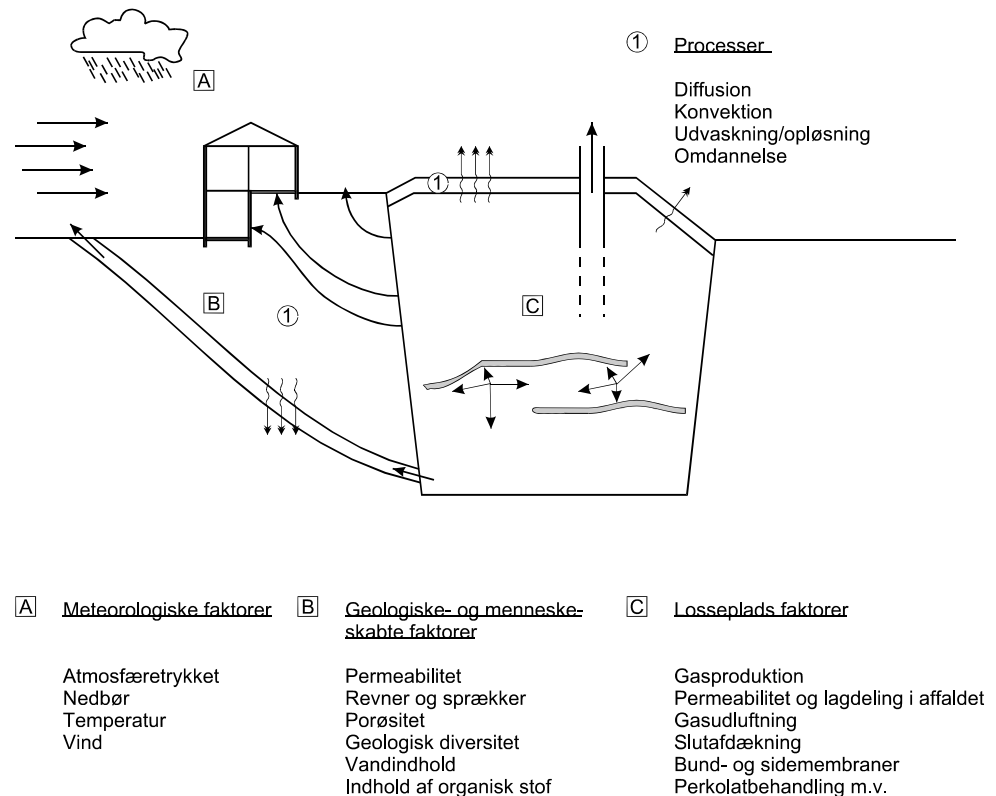
$$Q_{\text{dannes}} \gg Q_{\text{migration}} \gg Q_{\text{uheld}}$$

Uheldsscenarier, hvor uheldsstedet ligger væk fra det gasproducerende område, vil være afhængig af, at gasmigration er tilstrækkelig stor. I praksis vil dette betyde, at risikoen for denne type uheld vil være afhængige af gasproduktionens størrelse, dvs. både gasproduktionsraten og lossepladsens størrelse.

4 Gasmigration

Gasmigration er betegnelsen for den gastransport, der sker i den umættede zone, både inden for selve lossepladsen og i den omgivende jord.

Gasmigrationen er i princippet styret af de samme forhold som f.eks. grundvandsstrømning: Der skal være en drivende kraft, og der skal være en strømningsvej. Men i modsætning til grundvand, der er stærkt påvirket af tyngdekraften, vil gassen i den umættede zone kunne bevæge sig frit i alle 3 dimensioner. Gassen vil således i princippet lige så gerne bevæge sig opad som nedad eller horisontalt, afhængigt af hvor den drivende kraft befinder sig, og hvilken strømningsvej, der er den letteste.



Figur 4.1 Illustration af gasmigration for lossepladsgas. Processerne, der styrer migrationen, er vist sammen med de faktorer, der har betydning for omfanget af gasmigrationen /1/

4.1 Migrationsmekanismer

Den drivende kraft for gasmigrationen opdeles normalt i to mekanismer, diffusiv transport, der skyldes koncentrationsforskelle, og konvektiv transport, der skyldes trykforskelle. Både konvektionen og diffusionen har indflydelse på gastransporten og det mønster, som gastransporten udviser. Ved vurdering af migrationen er det derfor nødvendigt at tage højde for både diffusion og konvektion.

4.1.1 Diffusiv transport

Diffusion skyldes molekulære kræfter, som bevirker, at stoffer vil bevæge sig fra et område med højere koncentration til et område med lavere koncentration. Den diffusive gastransport drives således af den koncentrationsgradient, der er mellem de to områder. Diffusionen vil, ud over de stofspecifikke parametre, også afhænge af jordens porøsitet og vandindhold. I Tabel 4.1 er givet diffusionskoefficienten for metan ved standard forhold (1 atm og 20 °C).

Tabel 4.1 Diffusionskoefficienten D for metan under standard forhold (20 °C og 1 atm). /2/

Materiale	Diffusionskoefficient, D (m ² /s)
Luft	$1,5 \times 10^{-5}$
Vand	$1,5 \times 10^{-9}$
Jord (tør): n=0,5 n=0,3 n=0,2 n=0,1	6×10^{-6} 3×10^{-6} 2×10^{-6} 7×10^{-7}

n er jordens porøsitet

For våd jord fås diffusionskoefficienten $D_{\text{våd}}$ ved at gange diffusionskoefficienten for tør jord $D_{\text{tør}}$ med (1-S):

$D_{\text{våd}} = D_{\text{tør}}(1-S)$. Hvor S er graden af vandindhold i porene, $S < 1,0$.

Til beregning af diffusionskoefficienten i poreluft anvendes ofte Millington's lov /3/, der giver forholdet mellem diffusionskoefficienten for en gas i luft og i et porøst medium:

$$(4.1) \quad D = D_o \cdot \varepsilon^{1,33},$$

hvor: D er den effektive diffusionskoefficient i det porøse medie (m²/s)
 D_o er diffusionskoefficienten i luft (m²/s)
 ε er porøsiteten i det porøse medie (dimensionsløs)

For gasser er diffusionskoefficienten omvendt proportional med kvadratroden af densiteten (Graham's lov), hvorfor metan vil diffundere ca. 1,65 gange hurtigere end kuldioxid.

Den diffusive transport foregår generelt langsommere end den konvektive transport og har også en mindre mulig rækkevidde fra lossepladsen. Diffusion vil normalt kunne beskrives ved Ficks første og anden lov:

$$(4.2) \quad F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Ficks 1. lov}),$$

hvor: F er fluxen pr. arealenhed (m³/m² s)
D er diffusionskoefficienten (m²/s)
C er koncentrationen (f.eks. % v/v)
x afstanden langs flow-retningen

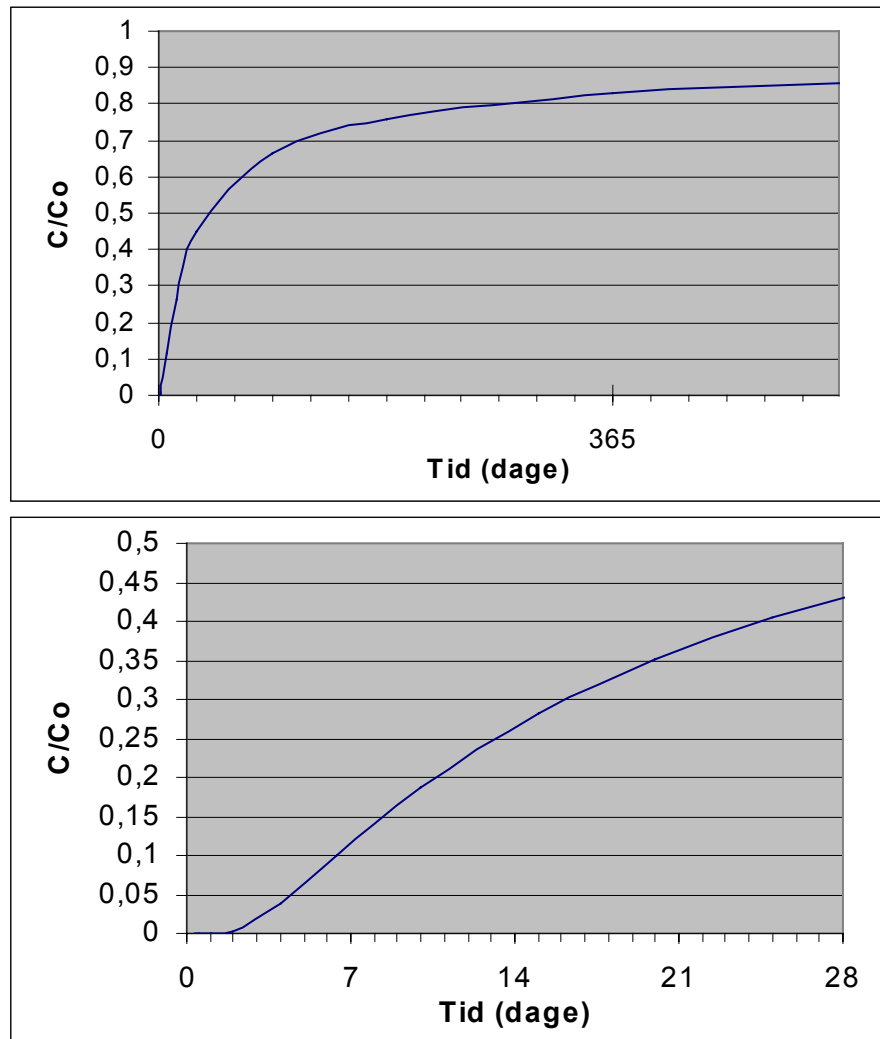
$$(4.3) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Ficks 2. lov})$$

Løsning af ligningen gives ved:

$$(4.4) \quad \frac{C}{C_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right),$$

hvor: C er koncentrationen af gas i punktet x meter væk til tiden t
 C_0 er initialkoncentrationen af gas ved $x=0$ m; $t=0$ sek
 t er tiden fra diffusionens start (sek)
 erfc er den komplementære fejlfunktion hvor $\operatorname{erfc}(z)=1-\operatorname{erf}(z)$

Ved brug af (4.4) kan f.eks. udviklingen i gaskoncentrationen i et bestemt punkt optegnes som funktion af tiden, jf. figur 4.2, hvor gasudviklingen i et punkt er optegnet som funktion af tiden. Kurven er optegnet for et punkt i en afstand $x = 3$ meter, for en tør sandjord med en porøsitet på $\varepsilon = 0,3$. Som det fremgår af figuren, vil udviklingen i gaskoncentrationen ske meget langsomt selv i et punkt, der ligger forholdsvis tæt på et gasproducerende område, hvis migrationen udelukkende skal ske ved diffusion. Således er koncentrationen først oppe på 10 % af initialkoncentrationen efter ca. en uge, på 50% efter ca. 40 dage og efter et år er koncentrationen oppe på ca. 82 % af initialkoncentrationen.



Figur 4.2 Udviklingen i gaskoncentrationen som funktion af tiden ved diffusiv gastransport. Ved beregningerne er anvendt en tør sandjord ($n=0,3$) og et punkt beliggende ved $x = 3$ m

I porøse medier, hvor porernes diameter er meget lille, vil gasmolekylerne kollidere med hinanden i porerne. I sådanne medier vil Fick's lov ikke gælde. I stedet anvendes Knudsens diffusion. For metan gælder det, at porerne skal være mindre end 500 Å (5×10^{-8} m). De fleste porer, der er i ler, er meget større end 500 Å (mindre porer vil være vandfyldte), hvilket betyder, at Knudsens diffusion i de fleste tilfælde ikke har betydning.

4.1.2 Konvektiv transport

Den konvektive gastransport drives af den trykgradient, der er mellem de to områder, hvor gasflowet vil ske fra områder med højt tryk til områder med lavere tryk. Temperaturforskelle vil ligeledes kunne føre til konvektiv gasmigration. Konvektion vil udover de stofspecifikke parametre (viskositet) også afhænge af jordens/fyldens gaspermeabilitet (porøsitet og vandindhold).

Trykforskelle, der kan forårsage konvektiv transport, kan skyldes flere årsager, f.eks. gasproduktion i lossepladsen, variationer i atmosfæretrykket, fluktuerende i grundvandsstanden og undertryk i bygninger. Disse forhold vil blive beskrevet nærmere i afsnit 4.2.

Konvektiv gastransport i porøse medier kan beskrives ved hjælp af Darcy's lov:

$$(4.5) \quad q = -C \frac{k}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \quad (\text{Darcy's lov}),$$

hvor:

- q er fluxen gennem et areal (g/m² sek) eller (m³/m² sek)
- C er gaskoncentrationen (g/m³) eller (m³/m³)
- k er gaspermeabiliteten (m²)
- μ er viskositeten (N/sek m²)
- Δ p er trykforskellen (Pa) over længden L (meter)

I tabel 2.1 er givet de fysiske parametre for lossepladsgassens komponenter.

4.2 Forhold der influerer på gasmigrationen

4.2.1 Permeabilitet

Den vigtigste faktor for gasmigrationen formodes at være gaspermeabiliteten for de jordlag, som migrationen skal ske igennem. Gaspermeabiliteten afhænger af permeabiliteten af jord/fyldlagene og vandindholdet i jorden. I tabel 4.2 er givet nogle intervaller/værdier for gaspermeabiliteten i tørre jorder.

Tabel 4.2 Typiske værdier for permeabilitet (k) for forskellige jorder, /1/ og /5/ samt empiriske værdier fundet ved feltforsøg i Danmark /COWI/

Jordtype	Gaspermeabilitet (k), m ²		
	/1/	/5/	Empiriske værdier
Moræneler	10 ⁻¹⁸ - 10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹³	
Ler	10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹⁵		
Lermuld	10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹⁵		
Muldet silt	10 ⁻¹⁶ - 10 ⁻¹⁴		
Silt	10 ⁻¹⁶ - 10 ⁻¹⁴		
Sandmuld	10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	1 x 10 ⁻¹² 1 x 10 ⁻¹² - 4 x 10 ⁻¹¹ 2 x 10 ⁻¹¹ - 6 x 10 ⁻¹¹ 6 x 10 ⁻¹¹ - 3 x 10 ⁻¹⁰
Leret sand	10 ⁻¹⁶ - 10 ⁻¹⁴		
Fin sand	10 ⁻¹³ - 10 ⁻¹¹		
Medium sand	10 ⁻¹² - 10 ⁻¹⁰		
Groft sand	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻⁹		
Grus	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻⁸	2 x 10 ⁻¹¹	

Erfaringerne fra radonundersøgelser viser, at specielt de lerede jorder har en meget højere gaspermeabilitet end de værdier, der typisk angives i lærebøger og andre opslagsværker som f.eks. /1/. Dette skyldes sandsynligvis tilstedeværelsen af opsprækninger og højpermeable sandslirer i leren. Vandindholdet i leren vil også have stor betydning for permeabiliteten, hvor et højt vandindhold vil give en lav gaspermeabilitet, idet de mange små porer i leren let lukkes af vandet. For lerede jorder har vandindholdet desuden betydning for hvor opsprækket jorden er. Når lerjorden udtørres, vil der opstå store sprækker i leren, der øger gaspermeabiliteten med flere dekader. Hvis vandindholdet stiger i jorden, vil sprækkerne forsvinde igen. I meget tørre perioder, vil gaspermeabiliteten i lerede jorder derfor være væsentligt forhøjet. I den umættede zone under bygninger vil moræneleren ligeledes ofte være udtørret og opsprækket, hvorfor gaspermeabiliteten under bygningerne kan være forholdsvis stor, selv i lerede jorder.

Fyld i lossepladser vil have en meget varierende permeabilitet, og der findes i litteraturen meget få referencer til gaspermeabilitet i fyld. Ventilationsforsøg i forbindelse med dimensionering af gasindvindingsanlæg har vist, at der ofte er en forholdsvis høj permeabilitet i nyere lossepladser, og ofte er den horizontale permeabilitet (på langs af affaldslagene) i samme størrelsesorden som permeabiliteten for groft sand, eller grus /1/. På grund af lagdelingen i affaldet vil den vertikale gaspermeabilitet ofte være størrelsesorden mindre.

I princippet vil permeabiliteten i fylden falde i takt med, at fylden bliver ældre, og fylden sætter sig. Ventilationsforsøg i forbindelse med dimensionering af afværgeforanstaltninger har vist, at der også i de ældre affaldsdepoter, hvor fylden er 30-40 år gammel, ofte er en forholdsvis høj permeabilitet. Dette kan bl.a. skyldes, at deponeringen dengang ikke foregik på samme måde som i dag, f.eks. blev fylden ikke kompakteret lige så effektivt, som det foregår i dag.

Forskelle i de geologiske lag bevirker, at gasmigrationen ikke sker homogent, men at den geografiske udbredelse af gasmigrationen kan variere meget. Specielt i moræneaflejringer kan der være meget stor variation i morænens indhold af ler og sand, og dermed i permeabiliteten. Gasmigrationen vil hovedsageligt ske i de lag med højest permeabilitet som illustreret i figur 4.1 og 4.8.

4.2.2 Menneskeskabte gasmigrationsveje

Der er mange potentielle gasmigrationsveje, der er menneskeskabte. De mest typiske i Danmark forekommer i forbindelse med rør og ledningsføringer i jorden. Da rør og ledningsføringerne i mange tilfælde føres frem og ind i bygninger under jorden, kan disse menneskeskabte migrationsveje skabe god mulighed for, at lossepladsgassen kan ledes hen til de omkringliggende bygninger.

For at beskytte rør og ledninger lægges disse ofte i sandet materialer med en høj permeabilitet, der gør, at gassen kan vandre i jorden langs rørføringen. Selvom rørene ikke er lagt i sand, vil det faktum, at jorden har været opgravet, bevirke, at jorden ofte har en højere permeabilitet end de omkringliggende jordlag.

Når der anvendes hule rør som kloakker og dræn, vil gassen også kunne vandre inde i selve røret. Forhøjede koncentrationer af metan og kuldioxid kan forekomme i kloakker, som følge af anaerob omsætning af det organiske materiale, der løber i kloakken. Hvis der i forbindelse med undersøgelser for lossepladsgas foretages målinger af metan i kloakker, kan det være svært at skelne mellem indsvivende lossepladsgas og den metan, der er i kloakken i forvejen.

Nogle steder lægges f.eks. telefon-, tv- og elkabler i trækrør, dvs. der lægges et plastrør i jorden, hvorigennem kablerne trækkes. Lossepladsgas vil ligeledes kunne transporteres over lange strækninger i sådanne rør.

I forbindelse med større byggerier etableres ingeniørgange og lignende, hvor alle installationer, som f.eks. fjernvarmerør, vandrør, el- og edb- og telefonkabler kan trækkes. I ingeniørgangene er der ofte dårlig ventilation, hvorfor gasindtrængning i disse kan være kritisk.

4.2.3 Tryk i lossepladsen

Den mikrobiologiske omsætning af fast kulstof til metan og kuldioxid bevirker, at der sker en trykændring i selve deponiet, idet molekyler på gasform fylder mere end molekyler på fast form. Hvor stort et overtryk, der dannes i lossepladsen, afhænger af, hvor stor en gasproduktion der er, og hvor let den dannede gas kan undslippe lossepladsen. Overtrykket i pladsen vil derfor afhænge af mægtigheden af fylden, gasproduktionsraten, fyldens gaspermeabilitet samt permeabiliteten af slutafdækning og evt. bund- og sidemembraner.

Specielt i de yngre lossepladser og/eller de idriftværende lossepladser kan man observere betydelige overtryk i poreluften. I idriftværende lossepladser vil affaldets permeabilitet have stor betydning for hvor stort overtryk, der kan observeres i pladsen. I pladser, hvor der er foretaget en god kompaktering af affaldet, og hvor den daglige afdækning enten ikke foretages, eller foretages med materiale med lav permeabilitet, vil man kunne observere at overtrykket i pladsen kan variere meget inden for få meter, både horisontalt og over dybden.

De største overtryk observeres dog oftest i affaldsceller, hvor der lige er foretaget slutafdækning. Dette skyldes at, gasproduktionsraten er meget høj,

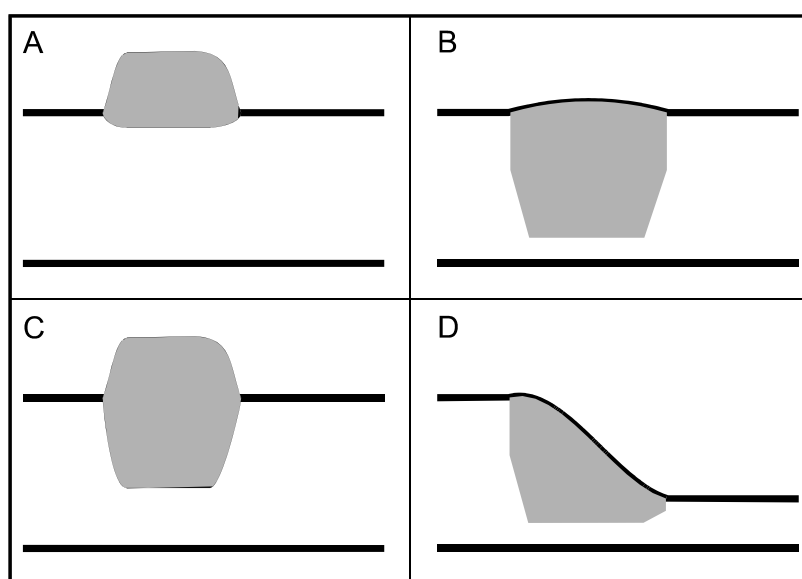
og at slutfædningen oftest er med en meget lav permeabilitet for at minimere infiltrationen af regnvand, og dermed dannelsen af perkolat.

I takt med at gasproduktionsraterne falder, vil trykket i lossepladserne også falde, og i ældre lossepladser vil trykforskellen mellem poreluften og atmosfæren oftest ikke være målelig, eller kun nogle få Pa (Pascal).

Som nævnt kan overtrykket i lossepladsen variere meget, og i litteraturen er der da også opgivet meget varierende overtryk. Ifølge Christensen et al. /1/ vil der typisk være overtryk på ca. 2.000 Pa (20 cm H₂O) under dæklaget i lossepladser med lavpermeabel slutfædning, der er i fase IV **den stabile metanogene fase.** Undersøgelser af en lang række gamle lossepladser har vist, at der i lossepladser i fase V eller VI kun sjældent er målbare overtryk (< 10 Pa). På grund af lavpermeable lag i lossepladsen vil der centralt i lossepladserne kunne måles højere tryk end i de øverste jordlag. I igangværende lossepladser kan der således måles op til 10.000 - 25.000 Pa (100 - 250 mbar) i den centrale del af lossepladsen, /1/.

4.2.4 Lossepladsens udformning

Lossepladsens udformning har også stor indflydelse for gasmigrationen til de omkringliggende områder. Som vist i figur 4.3 kan lossepladserne opdeles i to hovedtyper, A) hvor opfyldningen sker på terræn og B) hvor opfyldningen sker i en lavning eller udgravning, f.eks. en tidligere råstofgrav. Mange lossepladser vil være en mellemting mellem de to hovedtyper, som f.eks. type C), der både er en opfyldning over og under terræn. Denne type losseplads forekommer typisk som opfyldning af en råstofgrav, hvor man for at udnytte lossepladsens kapacitet maksimalt også foretager en opfyldning over terræn. Den sidste type, der er vist i figur 4.3, D) er en opfyldning foretaget i en bakkeskråning. Denne type losseplads er også meget almindelig og forekommer typisk i forbindelse med opfyldning af råstofgrave, der er udgravet i bakkeskråninger.



Figur 4.3 Forskellige typer af lossepladser

Den horisontale gasudsivning fra lossepladsen vil afhænge af hvor meget af lossepladsen, der er beliggende under det omgivende terræn, og hvor let

gassen kan undslippe horisontalt. Da gasmigrationen alt overvejende sker i den umættede zone, vil det være lossepladsens dybde/mægtighed i den umættede zone, der er afgørende. Den del af lossepladsen, der eventuelt ligger under grundvandsspejlet, vil kun i mindre omfang have betydning for den horisontale gasmigration.

Ved lossepladser, hvor opfyldningen er sket på terræn, vil kontaktfladen mod jorden være begrænset, og den horisontale gasudsivning vil derfor være mindre fra denne type af lossepladser.

Gassens mulighed for at undslippe horisontalt vil både afhænge af lossepladsens slutaftdækning og lossepladsens udformning. I figur 4.3 har lossepladserne B) og C) den samme kontaktflade mod jorden, men fordi lossepladstype C) har en væsentlig opfyldning over terræn, vil gassen fra den nedre del af lossepladsen have svære ved at undslippe til overfladen af lossepladsen, hvorfor der alt andet lige vil ske en større horisontal gasmigration fra lossepladser af type C) end fra lossepladser af type B).

4.2.5 Meteorologiske faktorer

De meteorologiske forhold har stor betydning for variationerne i gasmigrationen. I Danmark har det specielt været ændringer i det atmosfæriske tryk, der er blevet fokuseret på /5/, men bl.a. undersøgelser og overvågning udført i forbindelse med afværgeforanstaltninger har vist, at der ikke er et entydigt forhold mellem gasudsivningen og variationerne i atmosfæretrykket, og at andre meteorologiske forhold som nedbør, temperatur og vindforhold også har betydning.

4.2.5.1 Variationer i atmosfæretrykket

Udover trykforskelle forårsaget af gasdannelsen kan der tillige opstå midlertidige trykforskelle forårsaget af ændringer af det atmosfæriske tryk (høj- og lavtrykspassager). På ældre lossepladser er gasdannelsen langsom, og de generelle trykforskelle mellem lossepladsen og atmosfæren er derfor begrænsede. Konvektiv transport ud af lossepladsen i større udstrækning vil derfor væsentligst kunne ske i forbindelse med hurtige ændringer af det atmosfæriske tryk (lavtrykspassager).

Det atmosfæriske tryk varierer på forskellige tidsskalaer (fra sekunder til dage). Sådanne trykændringer udbreder sig diffusivt i jorden med udbredelsestider, som afhænger af permeabilitet og porøsitet. Jorden reagerer ikke på ændringer af atmosfæretrykket, som er "for hurtige" i forhold til jordens endelige tidsrespons.

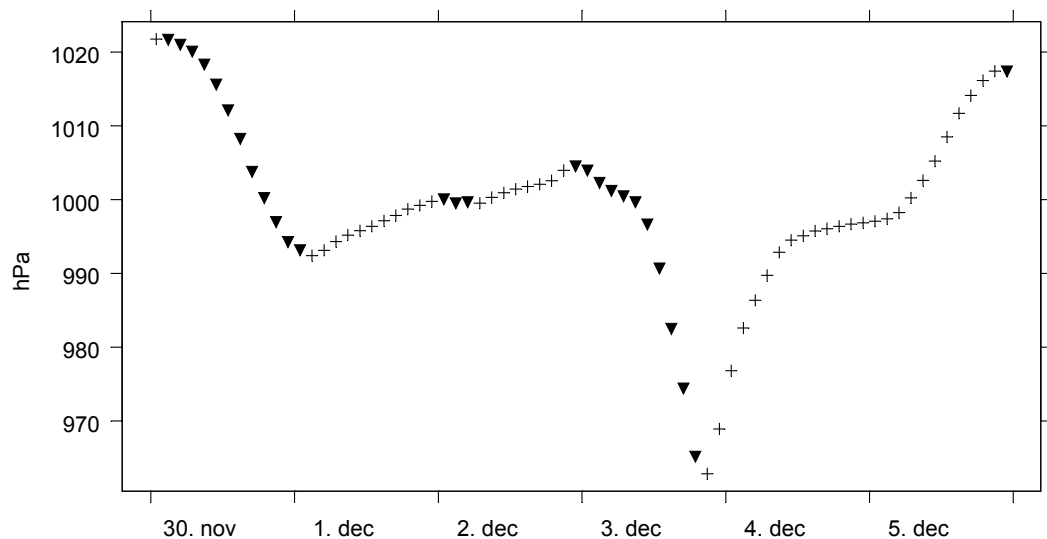
For at vurdere hyppigheden af forskellige størrelser af trykfald er der foretaget en statistisk analyse af en tidsserie af det atmosfæriske tryk. Data er stillet til rådighed af Afd. for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø. Målingerne er foretaget i 8 meters højde på Risø. Målefrekvensen er 1 måling per 10 minutter. Datasættet strækker sig fra 1. januar 1997 til 31. december 1999.

Figur 4.4 viser et eksempel på det tidsmæssige forløb af atmosfæretrykket omkring orkanen den 3. december 1999. Ved hjælp af en simpel filtrering af data er perioder med sammenhængende trykfald og trykstigninger

identificeret. Eksempelvis forekommer der et sammenhængende trykfald igennem dagen d. 30. november 1999. Begivenheden varer 24 timer og giver anledning til et samlet trykfald på 39 hPa (3.900 Pa). Tilsvarende forekommer der den 3. december 1999 et samlet trykfald på 39 hPa over 22 timer, hvilket giver en gennemsnitlig trykændring på 1,77 hPa/time.

For den undersøgte treårs periode forekommer der i alt 400 sammenhængende trykfald (og 400 trykstigninger). I 47 % af tiden er der trykfald og i 53 % af tiden er der trykstigning.

Ændringerne i atmosfæretrykket kan udtrykkes på flere måder, dels den totale trykændring, hastigheden hvormed trykændringen sker samt hvor længe trykfaldet varer. Figur 4.5 viser hyppigheden af trykfaldenes varighed i timer, størrelse i hPa og ændringshastighed i hPa/timer.



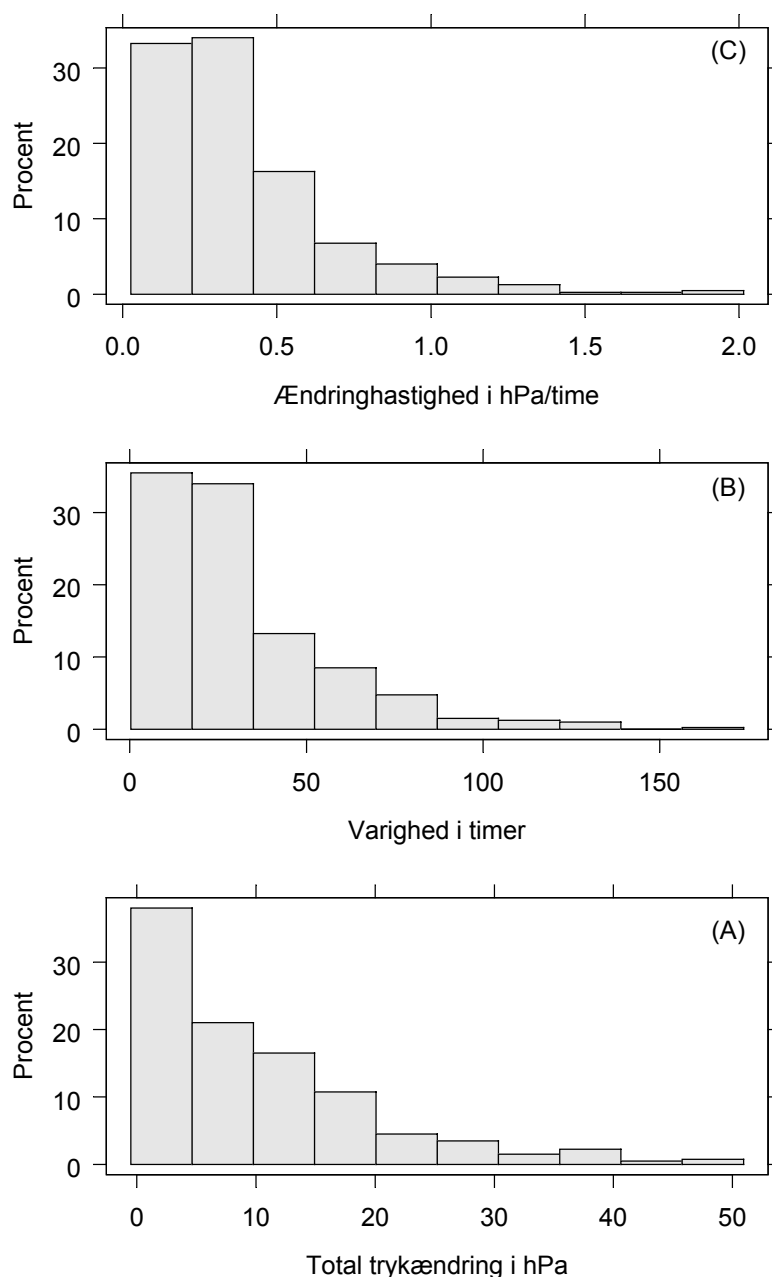
Figur 4.4 Trykket som funktion af tiden fra 30. november til 6. december, 1999. Aksemarkeringerne angiver midnat. Sammenhængende trykstigninger er markeret ved plusser (+). Sammenhængende trykfald er markeret ved nedadgående trekanter

Omkring 18 % af alle trykfald varer længere end 50 timer. Dvs. at omkring 24 gange ($= 18 \% \cdot 400 \cdot 1/3$) om året forekommer der sammenhængende trykfald af en varighed over 50 timer. 2,7 % af alle trykfald varer længere end 100 timer.

For 13 % af alle trykfald falder trykket sammenlagt 20 hPa eller mere. I 1,5 % af tilfældene er trykfaldet over 40 hPa.

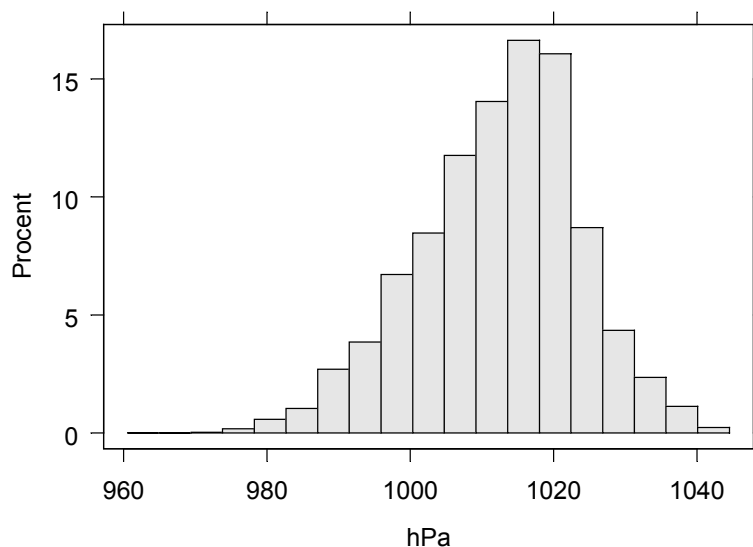
For 24 % af tilfældene forekommer der ændringshastigheder, som er hurtigere end 0,5 hPa per time. I 4 % af tilfældene er hastigheden over 1 hPa/time.

I ovenstående analyse er der ikke taget hensyn til mikro-oscillationer i atmosfæretrykket.



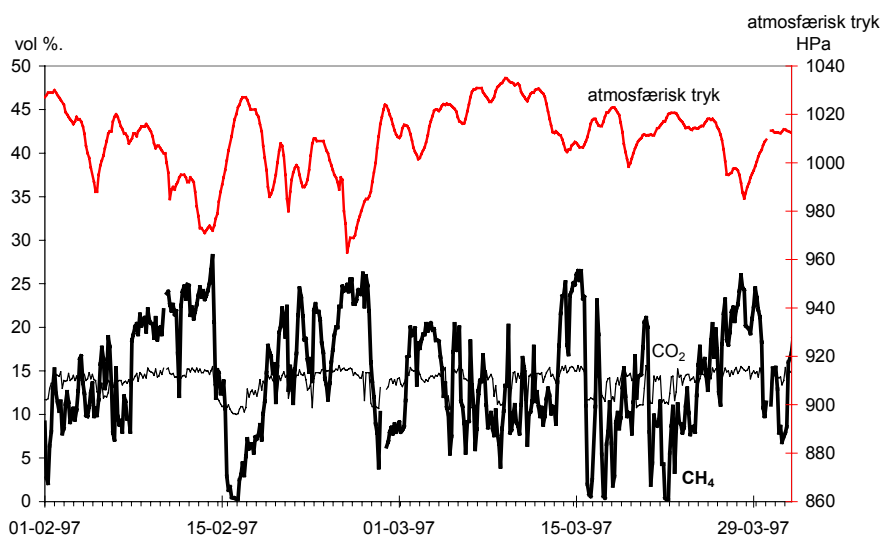
Figur 4.5 Beskrivende statistik for 400 sammenhængende trykfald observeret på Risø 1997-99.

Trykkets absolutte størrelse formodes også at spille en rolle for gasmigration: Ved lavtryk er der størst tendens til gasmigration. Figur 4.6 viser et hyppighedsdiagram for trykkets størrelse på Risø (se beskrivelse ovenfor). I gennemsnit er trykket 1012,4 hPa. I 3,4 % af tiden er trykket lavere end 980 hPa. I 14 % af tiden er trykket lavere end 1000 hPa. Bemærk, at fordelingen af tryk ikke følger en normalfordeling.



Figur 4.6 Fordelingen af tryk observeret på Risø i 1997- 99

Sammenhængen mellem koncentrationerne i poreluften af lossepladsgas og trykket i atmosfæren er beskrevet flere steder i litteraturen /1/, /2/ og /6/. Også under danske forhold er der bl.a. i forbindelse med afværgeforanstaltninger for lossepladsgas foretaget målinger af gaskoncentrationerne og atmosfæretrykket over længere tidsperioder. For Københavns Amt blev der i 1997 foretaget målinger af gaskoncentrationen i en afværgeforanstaltning på Lyngby Losseplads. Gaskoncentrationerne blev målt dels i afværgeforanstaltningens afkastet, dels i selve fylden. I figur 4.7 er givet et eksempel på sammenhængen mellem gaskoncentrationen i fylden og atmosfæretrykket.



Figur 4.7 Ændringer i gassammensætningen i fylden på Lyngby Losseplads. Poreluftskoncentrationerne er målt i Monitoringsboring MV1, der er filtersat fra 2 til 3 m u.t. /30/

Som det ses af figur 4.7, er der en tydelig sammenhæng mellem variationerne i atmosfæretrykket og de målte gaskoncentrationer. En nærmere gennemgang viser dog også, at sammenhængen mellem variationerne i atmosfæretrykket og variationerne i lossepladsgassen ikke altid følges, således kan f.eks. store variationer i koncentrationen i poreluften godt optræde i perioder, hvor der kun er små variationer i trykket i atmosfæren og omvendt.

Fluxkammermålinger af gasopsivningen fra lossepladser /1/ viser ligeledes, at der ikke er nogen entydig sammenhæng mellem trykfaldenes størrelse og størrelsen af gasopsivningen og gaskoncentrationerne. Målingerne viser, at gasfluxen er ekstremt uregelmæssige, og resultaterne er svære både at reproducere og forudsige /1/.

I den tilgængelige litteratur er der kun meget få oplysninger om sammenhængen mellem de meteorologiske forhold og gasmigration. Målinger udført i tidsserier har vist, at der er visse fællestræk ved hovedparten af de lavtryksperioder, hvor der observeres høj gasflux i jorden. Det samlede trykfald skal være af en vis størrelse (>15 hPa), og tiden fra trykfaldet starter til der igen sker en signifikant trykstigning skal have en vis længde (>2 døgn). Hastigheden, hvorved trykket falder, er af mindre betydning. Der skal dog være et signifikant trykfald ($>0,3$ hPa/time).

I forbindelse med afværgeforanstaltninger for lossepladsgas, foretages der ved et større erhvervsbyggeri løbende kontrol af gasopsivningen. Overvågningen har vist, at trykfaldet den 3. december 1999 ikke resulterede i væsentlige ændringer i gasopsivningen. Dette kan bl.a. skyldes, at selvom trykfaldet var meget kraftigt (39 hPa over 22 time), så steg trykket næsten lige så hurtigt igen, jf. figur 4.4. Tiden som trykfaldet varede, var således for kort til, at det kraftige trykfald kunne påvirke gasfluxen.

Vertikale gasmigration Teoretisk kan den vertikale gasmigration (gasopsivning) beregnes ud fra idealgasloven

$$(4.6) \quad p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{idealgasloven}),$$

hvor

- p er trykket (Pa)
- V er volumen af gassen (m^3)
- n er antallet af mol gas (mol)
- R er gaskonstanten ($\text{Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ Kelvin}^{-1}$)
- T er temperaturen i Kelvin

Det forudsættes, at temperaturen er konstant under trykfaldet, og da antallet af mol holdes konstant, er:

$$(4.7) \quad p \cdot V = K$$

Det betyder, at der er følgende sammenhæng mellem tryk og volumen før og efter trykfaldet:

$$(4.8) \quad p \cdot V = p' \cdot V' \Leftrightarrow V' = \frac{p \cdot V}{p'},$$

hvor: p' og V' er tryk og volumen efter trykfaldet.

Fluxen (Q) af poreluft pr. areal overflade (A), der vil ske som følge af et trykfald, vil afhænge af jordens/fyldens porøsitet (ε) og vandindhold (S), samt højden af den umættede zone (h), således at:

$$(4.9) \quad Q = \frac{\Delta V}{A} = \varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h,$$

hvor: $\Delta V = V' - V$

Gasopsivningen kan nu beregnes ud fra (4.8) og (4.9):

$$(4.10) \quad V' = \frac{p \cdot V}{p'} = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h \cdot A)}{p'}$$

$$\Downarrow$$

$$\Delta V = \frac{p \cdot V}{p'} - V = \frac{p \cdot V - p' \cdot V}{p'} = \frac{(p - p')(\varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h \cdot A)}{p'}$$

$$(4.11) \quad Q = \frac{\Delta V}{A} = \frac{(p - p')(\varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h)}{p'}$$

En trykændring på f.eks. 20 hPa (fra 1020 hPa til 1000 hPa) vil bevirke, at der sker en gasflux på 2 % af det samlede gasvolumen:

$$(4.12) \quad Q = \frac{(1200 - 1000)}{1000} (\varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h) = 0,02(\varepsilon \cdot (1 - S) \cdot h)$$

Med f.eks. en porøsitet $\varepsilon = 0,3$ og et vandindhold $S = 25\%$ samt en højde af den umættede zone $h = 5$ m fås en gasflux (Q) på:

$$(4.13) \quad Q = \frac{(1200 - 1000)}{1000} (0,3 \cdot (1 - 0,25) \cdot 5) = 0,2 \cdot 1,125 = 0,225 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Hvis trykfaldet sker over en periode på $1\frac{1}{2}$ døgn, bliver den gennemsnitlige gasopsivning på ca. 6 l/m² pr time.

Variationer i atmosfærens tryk vil også bevirke, at der sker en fluktuation i grundvandsspejlet, som yderligere vil fremme gasopsivningen. Ofte vil dette bidrag være forholdsvis lille, idet der ofte vil være tale om et frit vandspejl.

Som nævnt tidligere i dette afsnit vil poreluften ikke reagere øjeblikkeligt på ændringer i atmosfæretrykket, idet der er en tidsrespons i jorden, som bl.a. skyldes, at trykændringerne udbreder sig diffusivt i jorden. I afsnit 5.1.2.2 er givet en beskrivelse af betydningen af de tidsmæssige forskydninger, for gasmigrationen.

Horisontal gasmigration

Som nævnt vil gasmigrationen kunne ske i alle tre dimensioner. I tilfælde, hvor den vertikale gasmigration hindres af f.eks. et lavpermeabelt dæklag eller tætte fastebelægninger, vil gasmigrationen i stedet kunne foregå som horisontal gasmigration ud i den omkringliggende jord. Undersøgelser ved bl.a. Skellingsted i Vestsjælland har da også vist, at der er sammenhæng mellem den horisontale gasudsivnings størrelse og ændringerne i trykket i atmosfæren /7/.

4.2.5.2 Nedbør

Nedbør kan have indflydelse på gasmigrationen på tre måder. Nedbøren kan bevirke at:

- Permeabiliteten i de øvre jordlag mindskes ved at porerne fyldes med vand, hvilket vil øge den horisontale gasmigration
- Vandindholdet i de dybere jordlag stiger, hvorved migrationen mindskes
- Det stigende vandindhold i porerne i fylden vil fortrænge poregassen, hvorved migrationen øges.

Effekten af nedbørens påvirkning er kun meget dårligt beskrevet i litteraturen, og en egentlig kvantificering af effekten er derfor svær.

I vintermånederne vil nedbør kombineret med efterfølgende frostvejr kunne forsegle jordoverfladen igennem en længere periode, hvorved den horisontale gasmigration vil forøges kraftigt, dels fordi der ikke kan ske en gasopsivning til atmosfæren, dels fordi atmosfærisk ilt ikke kan trænge ned i jorden, hvorved metanoxidationen hindres.

4.2.5.3 Temperatur

En række af de stofspecifikke parametre, som indgår i diffusionsligningerne, er temperaturafhængige, bl.a. diffusionskoefficienten, viskositeten og densiteten. Generelt vil gasmigrationen øges ved stigende temperatur. I de øvre jordlag vil temperaturen følge den generelle overfladetemperatur, medens temperaturen i de dybere jordlag vil være forholdsvis konstant. Således er der i 3 m's dybde kun målt variationer i på ± 1 °C /8/.

I lossepladser med en kraftig gasproduktion vil der være forholdsvis høje temperaturer i fylden. Lossepladsgassen vil derfor være varm, når migrationen starter, men i den omkringliggende jord vil gassen hurtigt afkøles. Målinger ved Skellingsted Losseplads har vist, at der ca. 11 m fra lossepladsen ikke kunne konstateres forhøjede temperaturer i poreluften /7/.

I de øvre jordlag vil gasmigrationen være kraftigt påvirket af metanoxidation, jf. kapitel 4.2.7. Undersøgelser har vist, at metanoxidationen ligeledes er stærkt temperaturafhængig /7/.

4.2.5.4 Årstidsvariationer

Undersøgelser ved bl.a. Skellingsted Losseplads /7/ har vist, at man i vinterperioden vil kunne observere gasmigration længere væk fra lossepladsen end om sommeren. Dette skyldes flere faktorer. Om vinteren er vandindholdet i jorden generelt højere end om sommeren, hvilket umiddelbart burde mindske gasmigrationen. Men højere vandindhold i de øvre jordlag vil mindske den vertikale gasmigration (gasopsivning) og dermed øge den horisontale gasmigration. Samtidigt hindres atmosfærisk luft i at trænge ned i jorden, hvorved metanoxidationen i jorden hindres. Længere perioder med sne og frost vil desuden kunne forsegle jorden, hvilket yderligere vil bidrage til den horisontale gasmigration /1/.

En stigning i den vertikale gasemission kan evt. forventes mod slutningen af vinteren/begyndelsen af foråret på grund af den større permeabilitet i jorden, dvs. når jorden er mindre vandmættet, og frosten går af jorden.

I vintermånederne januar og februar samt høstmånederne august og september vil vejret ofte være ustabil med mange og kraftige lavtrykspassager, der kan give anledning til en væsentlig gasmigration.

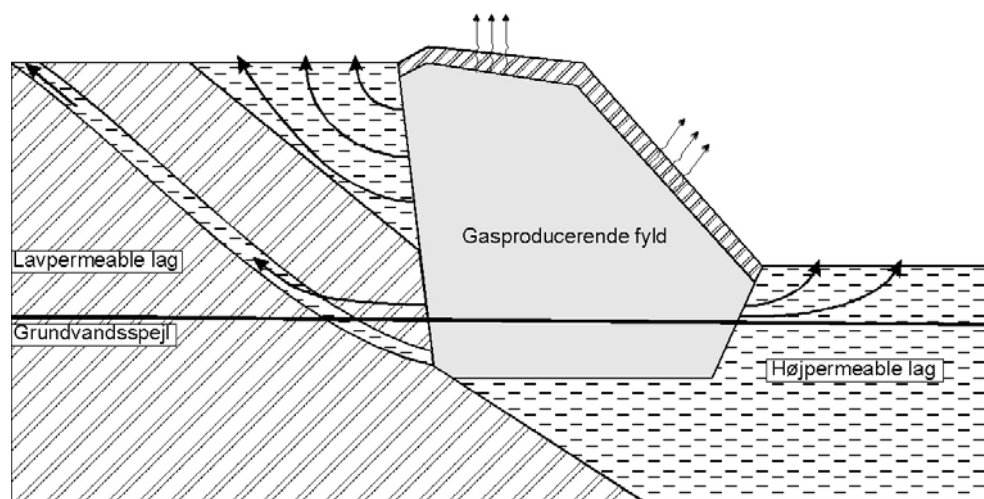
I sommerperioden burde gasmigrationen være højere end om vinteren, men undersøgelserne ved Skellingsted Losseplads /7/ har vist, at der generelt blev målt højere gasmigrationer om vinteren end om sommeren. Ved undersøgelsen kunne der således kun måles lav eller ingen opsvining af metan om sommeren, medens der stadig kunne måles opsvining af kuldioxid. Den lave opsvining af metan om sommeren tilskrives hovedsageligt den mikrobielle oxidation af metan, der er væsentligt højere om sommeren end om vinteren jf. kapitel 4.2.7. Ved undersøgelser i Sverige er der konstateret det samme mønster /8/. De svenske undersøgelser viste, at den største gasopsivning fra lossepladsen skete om sommeren, men at metanoxidationen i de øvre jordlag er så kraftig i sommerperioden, at gasopsivningen udelukkende sker i form af kuldioxid. Metanopsivning kunne kun konstateres i vinterperioden på tidspunkter med frost.

4.2.6 Grundvandsspejl

På grund af gassernes lave diffusion i vand vil grundvandsspejlet virke som en barriere for gasmigrationen. Gasmigrationen vil derfor normalt kun forekomme i den umættede zone, som vist i figur 4.8. Hvis der er et meget højt overtryk i lossepladsen, vil der dog også kunne observeres gasmigration under grundvandsspejlet, såfremt de geologiske lag begunstiger dette, jf. beskrivelsen af gasulykken i Loscoe i bilag 5.

Som nævnt i afsnit 4.2.5 har grundvandsspejlets placering og dermed gasreservoirets størrelse betydning for gasmigrationen. Jo større den umættede zone er, jo større en effekt har et givent trykfald i atmosfæren på gasmigrationen, jf. ligning 4.12.

Den umættede zones størrelse har også betydning for den horisontale gasmigration. For lossepladser, hvor gasmigrationen sker i områder, hvor grundvandsspejlet ligger terrænnært, vil den horisontale gasmigration have en ringere udbredelse, end hvis gasmigrationen sker i et område, hvor grundvandsspejlet ligger dybere. Der er i litteraturen ikke fundet oplysninger, hvor størrelsen af den umættede zone sammenlignes med den horisontale gasudbredelse.



Figur 4.8 Gasmigration i højpermeable jordlag, og betydningen af grundvandsspejlets beliggenhed for den horisontale gasudbredelse

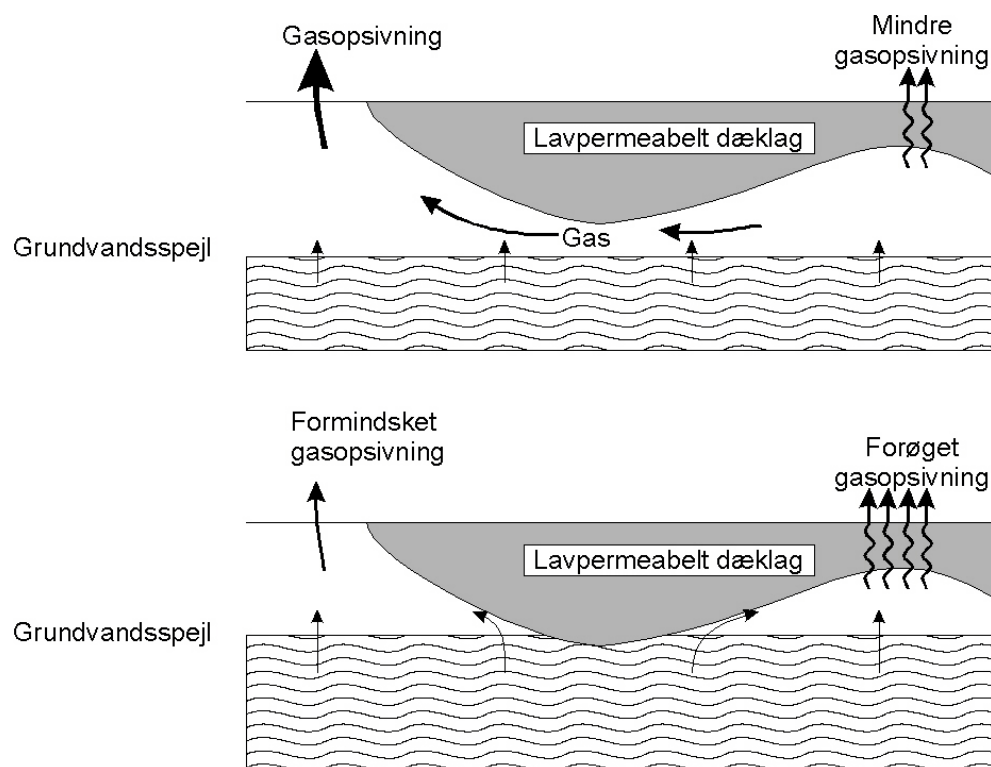
4.2.6.1 Tidevand

Pludselige ændringer i grundvandsspejlet vil kunne give en pumpeeffekt, hvor trykket i poreluften ændres, og dermed giver anledning til konvektiv transport.

På områder, som ligger meget kystnært opfyldninger i havet, vil grundvandsspejlet være afhængigt af vandstanden i recipienten. Dette kan betyde, at der i løbet af få timer kan ske en stor ændring i højden af vandspejlet. For lossepladser, der er anlagt som opfyldninger i havet, vil disse grundvandsændringer have stor indflydelse på den konvektive gastransport. Med en umættet zone på 3 m vil en hævn timer af vandspejlet på 0,5 m betyde, at den umættede zone reduceres med ca. 16,7 %, hvilket svarer til, at der kommer en trykstigning på ca. 170 mbar, som under normale omstændigheder hurtigt vil blive udlignet, ved at der sker en gasudsivning fra lossepladsen. Såfremt trykudligningen er total, vil en hævn timer af vandspejlet på 0,5 m betyde, at der sker en gasudsivning på ca. 125 liter pr. m² overflade. I lossepladser, som er anlagt som kystopfyldning, er mægtigheden af den umættede zone ofte ringe (<3 m). I sådanne lossepladser vil ændringer i grundvandsspejlet ofte have større betydning for den konvektive gastransport end ændringer i atmosfæretrykket.

Ændringerne i grundvandsspejlet vil dels afhænge af ændringerne i vandstanden i recipienten (havet) og dels af i hvor høj grad, disse ændringer vil slå igennem i vandspejlet i fylden. Ændringerne i grundvandsspejlet og hyppigheden af disse kan derfor kun fastslås ved simultane målinger af udviklingen i grundvandsspejlet og vandstanden i recipienten.

Ændringer i grundvandsstanden vil også kunne influere på gasmigrationen ved at ændre gasmigrationsvejene som vist i figur 4.9.

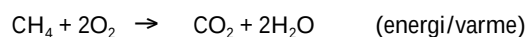


Figur 4.9 Grundvandsspejlets indflydelse på gasmigrationsvejene /3/

4.2.7 Metanoxidation

Under aerobe forhold vil der ske en mikrobiel omsætning af metan til kuldioxid og vand efter ligningen i box 4. Reaktionen vil forløbe hurtigt og helt til ende, dvs. til enten metan eller kuldioxiden er opbrugt. Reaktionen er eksotermisk, og der dannes ca. 870 kJ/mol CH_4 /1/

Box 4 Metanoxidation



Metanoxidationen vil hovedsageligt forekomme i de øvre jordlag, men i det omfang, der er aerobe forhold i dybere jordlag, vil metanoxidationen også forløbe her /8/. Et eksempel herpå kan ses på figur 4.7, hvor det kan ses, at ændringerne i metankoncentrationerne er langt større end koncentrationerne af kuldioxid. Dette skyldes, at der ved stigende atmosfærisk tryk presses iltholdigt atmosfærisk luft ned i fylden, hvilket bevirker et fald i koncentrationen af lossepladsgas (metan og kuldioxid). Da der nu både er metan og ilt i fylden, vil der ske en oxidation af metanen, hvorved metankoncentrationerne falder yderligere, medens koncentrationen af kuldioxid stiger.

Ved metanoxidationen omdannes 3 mol gas (metan og ilt) til 1 mol gas (kuldioxid) plus vand, hvilket vil bevirke, at der sker et trykfald lokalt, hvor oxidationen foregår, hvorved gasmigrationen hen mod det sted, hvor oxidationen foregår, øges. Effekten øges yderligere af, at kuldioxid har en større opløselighed i vand end metan og ilt. Da atmosfærisk luft indeholder ca. 4/5 kvælstof (N_2), som ikke deltager i reaktionen, vil ændringen i blive mindre. Ved en oxidation af en blanding af lossepladsgas (60 % CH_4 og 40 % CO_2) og

atmosfærisk luft (21 % O₂ og 79 % N₂) i en lukket beholder, vil ændringen i af antallet af gasmolekyler og dermed trykket falde med ca. 1/5 jf. box 5.

Box 5 Ændring i trykket ved metanoxidation i en lukket beholder med lossepladsgas (60 % CH₄ og 40 % CO₂) og atmosfærisk luft (21% O₂ og 79 % N₂)

	CH ₄	+ 2O ₂	→	CO ₂	+ 2H ₂ O	+ N ₂	Sum (gas)
Start:	0,6 mol	1,2 mol		0,4 mol	0,0 mol	4,5 mol	6,7 mol
Slut:	0 mol	0 mol		1,0 mol	1,2 mol	4,5 mol	5,5 mol
Slut %	0 %	0 %		18 %	-	82 %	100 %

Trykfald ved reaktion: (6,7-5,5)/6,7 = 18 %

Undersøgelser af gasemissioner på lossepladser har vist, at den metanoxidation, der foregår i dæklaget på lossepladsen, ofte er så kraftig, at kun brøkdele af den metan, der produceres, undslipper til atmosfæren. Ofte vil det samlede potentiale for metanoxidation i dæklaget være større end den samlede gasproduktion, der foregår i fylden /4/. Som andre biologiske processer er metanoxidationen afhængig af bl.a. temperaturen og fugtigheden. Metanoxidation har sit optimum mellem 25 og 30 °C /4/. Både danske /7/ og svenske /8/ undersøgelser har vist, at årstidsvariationerne har stor betydning for den metanoxidation, der foregår i de øverste jordlag. De svenske undersøgelser viste, at selv om den største gasopsivning fra lossepladsen skete om sommeren, så var metanoxidationen i de øvre jordlag så kraftig i sommerperioden, at gasopsivningen udelukkende skete i form af kuldioxidemissioner. Metanopsivning kunne kun konstateres i vinterperioden på tidspunkter med frost. De danske undersøgelser, der er udført ved Skellingsted Losseplads, viser det samme mønster. I sommerperioden er metanoxidationen i de øvre jordlag så kraftig, at gasopsivningen kun sker i form af kuldioxidemissioner.

Undersøgelserne ved Skellingsted viser, at metanoxidationen i de dybere liggende jordlag begrænser metanmigrationen, men at den ikke kan forhindre, at der sker en betydelig horisontal gasmigration.

Under bygninger vil metanoxidationen være begrænset af, at ilten fra atmosfæren kun i begrænset omfang vil kunne trænge ned i jordlagene/fylden under bygningen. Metanoxidationen vil ligeledes være begrænset af, at jordlagene/fylden i den umættede zone under bygningen vil være meget tørre. Der er i litteraturen ikke fundet oplysninger om, hvorvidt der foregår metanoxidation under bygninger og befæstede arealer, men det vurderes umiddelbart, at metanoxidation kun vil foregå i meget begrænset omfang.

4.2.8 Opløsning/udvaskning

Kuldioxid er ca. 50 til 100 gange mere opløselig i vand end de øvrige hovedkomponenter i poreluften omkring lossepladser (CH₄, O₂ og N₂). Kuldioxidens store opløselighed i vand skyldes, at kuldioxiden opløses til kulsyre, der afhængigt af pH i vandet vil omdannes til bikarbonat og karbonat.

I lossepladser, hvor gasproduktionen er meget ringe, eller i områder, hvor gasmigrationen foregår meget langsomt, vil udvaskningen af kuldioxid have en stor betydning for gassammensætningen i lossepladsen. Dette skyldes, at udvaskningen af kuldioxid bevirker, at den relative koncentration af de øvrige

gasser i poreluften øges. I ældre lossepladser er det derfor ikke ualmindeligt at kunne måle koncentrationer af metan på op til 70 % v/v.

4.2.9 Dæklag og overfladebelægning

I det omfang dæklag, overfladebelægninger o.a. hindrer, at der sker en vertikal gasopsivning fra et område, vil der ske en forøget horisontal gasmigration væk fra området, og dermed en øget gasopsivning i naboområderne.

Dæklagets permeabilitet har naturligvis betydning for i hvor stort et omfang, der vil kunne ske en vertikal gasopsivning fra lossepladsen. På specielt ældre lossepladser vil lossepladsens anvendelse ligeledes have indflydelse på i hvilket omfang, der vil kunne ske en horisontal gasopsivning. Større områder med lavpermeabel fast belægning vil bevirke, at der sker en forøget gasopsivning i områderne op til den faste belægning

Hvis gasopsivningen på lossepladsen mindskes væsentligt, vil dette bevirke, at der sker en forøget horisontal gasudsvivning fra lossepladsen. På ældre lossepladser vil en mindskelse af gasopsivningen typisk forekomme, hvis lossepladsen er afdækket med et lavpermeabel dæklag, eller hvis der er større dele af lossepladsen, der er dækket med faste belægninger.

4.3 Vurdering af gasmigrationsfremmende forhold

Ved vurderingen af risikoen for gaseksplosionsuheld skal der foretages en vurdering af, i hvilket omfang den gas, der genereres i fylden, vil kunne sive fra området i fylden, hvor den produceres, til en nærliggende bygning eller lignende, hvor gasuheldet kan ske (gasmigration). Vurderingen af gasmigrationen opdeles i tre dele:

- Vurdering af i hvilket omfang forholdene i de gasproducerende fyldlag fremmer gasmigrationen fra det gasproducerende område (vurdering af gasmigrationsfremmende forhold). Beskrives i dette afsnit.
- Vurdering af i hvilket omfang der sker gasmigration mellem det gasproducerende område og bygningen (vurdering af horisontal gasmigration/begrænsning af gasmigration). Beskrives i afsnit 4.4.
- Vurdering af gasindsivning i bygninger eller lignende. Beskrives i afsnit 5.

Ved vurderingen af i hvilket omfang forholdene i de gasproducerende områder fremmer gasmigrationen, foretages primært en vurdering af de stationære forhold i fylden. De stationære forhold er forhold, der ikke ændrer sig over tiden eller, som kun ændrer sig meget langsomt f.eks. permeabilitet og tryk i fylden. Desuden foretages en vurdering af de varierende forhold, dvs. forhold der varierer, som f.eks. meteorologiske forhold, og tidevandspåvirket grundvandsspejl.

Som det fremgår af de foregående afsnit, er gasmigration fra lossepladser kun i meget ringe omfang beskrevet i litteraturen, og der er kun udført meget få felteksperimenter for at eftervise teorierne omkring gasmigration. Ved vurderingen af den horisontale gasmigration er det derfor nødvendigt i høj grad at basere vurderingerne på empiriske betragtninger.

4.3.1 Stationære forhold

Permeabilitet

Ventilationsforsøg i både idriftværende og gamle lossepladser har vist, at den horisontale permeabilitet i lossepladser oftest er meget høj og i samme størrelsesorden som for groft sand.

I nyere lossepladser, hvor der er foretaget en god kompaktering af affaldet, er den vertikale permeabilitet væsentlig dårligere og ofte størrelsesordner mindre. Dette bekræftes af, at man i nyere lossepladser ofte observerer flere vandspejl i fylden, og at trykket i lossepladsen kan ændre sig meget over dybden.

I ældre lossepladser, hvor kompakteringen ikke foregik så effektivt, findes der ofte høje permeabiliteter både vertikalt og horisontalt, og det er sjældent at finde flere vandspejl i fylden.

Tabel 4.3 Vurdering af permeabilitetens betydning for gasmigration i det gasproducerende fyld

Beskrivelse	Permeabilitet (m ²)
God permeabilitet, hvor gasmigration altid vil kunne foregå	$>10^{-11}$
Moderat til god permeabilitet, hvor gasmigration almindeligvis vil kunne foregå	10^{-11} - 10^{-12}
Dårlig permeabilitet, hvor gasmigration er begrænset.	10^{-12} - 10^{-13}
Meget dårlig permeabilitet, hvor gasmigration sjældent foregår.	$<10^{-13}$

Tryk i fylden

I idriftværende lossepladser eller lossepladser, der nyligt er afsluttet, kan der være et anseeligt overtryk i fylden (>1000 Pa) som følge af den omsætning, der foregår. I gamle lossepladser vil der derimod sjældent kunne måles signifikante overtryk i pladserne, og trykket vil ofte være under 10 Pa.

Tabel 4.4 Vurdering af overtryk i poreluftens betydning for gasmigration i det gasproducerende fyld

Beskrivelse	Overtryk i fylden (Pa)
Stort overtryk, hvor gasmigration altid vil kunne foregå.	>1000
Moderat overtryk, hvor gasmigration almindeligvis vil kunne foregå	>100
Lavt overtryk, hvor gasmigration er begrænset	>10
Ingen overtryk, hvor gasmigration sjældent foregår.	<10

Grundvandsspejl

De meteorologiske forhold som f.eks. ændringer i atmosfæretrykket eller nedbør og frost, der lukker jordoverfladen, vil have betydning for, i hvor stort omfang den producerede gas vil migrere ud af lossepladsen. Størrelsen af gasmigrationen vil naturligvis afhænge af størrelsen og hurtigheden af ændringerne i de meteorologiske forhold, men også den umættede zones størrelse har betydning for, hvor stor påvirkning ændringer i meteorologiske forhold får for gasmigrationen. Jo dybere grundvandsspejlet ligger, jo større er det gasreservoir, der påvirkes, og dermed mængden af gas, der vil vandre som følge af en given ændring i de meteorologiske forhold.

Hvis grundvandsspejlet er dybere end 10 m, vil det normalt ikke have en begrænsende effekt på gasmigrationen. Hvis grundvandet ligger i dybden 0 til 2 meter vil det formentlig reducere gasmigrationen med ca. 75 %.

Tabel 4.5 Vurdering af den umættede zones størrelse for gasmigration i det gasproducerende fyld

Beskrivelse	Højde af umættede zone
Stort dybde, hvor gasmigration altid vil kunne foregå.	>10 m
Moderat dybde, hvor gasmigration almindeligvis vil kunne foregå	5 - 10 m
Lav dybde, hvor gasmigration er begrænset	2-5 m
Meget lav dybde, hvor gasmigration sjældent foregår.	<2 m

4.3.2 Variable forhold

Af de meteorologiske forhold er ændringerne i atmosfæretrykket af størst vigtighed for de gasmigrationsfremmende forhold. Af det statistiske materiale fra Risø fremgår det, at der over en 3-årig periode forekom ca. 400 sammenhængende trykfald, og at i 47 % af tiden er trykket faldende. Som nævnt i afsnit 4.2.5 så er sammenhængen mellem trykændringerne i atmosfæren og gasmigrationen uregelmæssig og svær at forudsige. Der er dog fællestræk for mange af de situationer, hvor der konstateres væsentlig gasmigration, trykfaldet skal være i mere end 2 døgn, og trykfaldet skal være på mere end 15 hPa. Cirka 18 % af trykfaldene varede i mere end 2 døgn, og ca. 23% af trykfaldene var på mere end 15 hPa. Cirka 20 % af trykfaldene, svarende til ca. 2 trykfald pr. måned, havde således et størrelse og længde, der bevirker, at der er gasmigrationsfremmende forhold.

I lossepladser, hvor opfyldningen er sket meget kystnært, evt. som opfyldning i selve recipienten, vil grundvandsspejlet variere i takt med ændringerne i vandstanden i recipienten. Specielt i lossepladser med en ringe umættet zone vurderes ændringerne i grundvandsspejlet at kunne have større betydning end de meteorologiske ændringer. Ændringer i grundvandsspejlet på 0,3 m vurderes at kunne give anledning til gasmigrationsfremmende forhold. Målinger på en losseplads ved Øresund har vist, at sådanne ændringer forekom ca. 1 gang i kvartalet.

4.4 Vurdering af horisontal gasmigration

I forrige afsnit blev der foretaget vurderinger af, i hvilket omfang forholdene i de gasproducerende fyldlag fremmer gasmigrationen fra det gasproducerende område. I dette afsnit beskrives i hvilket omfang, der sker gasmigration mellem det gasproducerende område og nærliggende bygninger eller bygværker.

Omkring lossepladser, hvor der foregår gasproduktion, vil der være en kontinuerlig gasudsvivning til omgivelserne både horisontalt og vertikalt, som stort set svarer til den gasproduktion, der foregår. Variationer i bl.a. de atmosfæriske forhold vil bevirke, at der vil kunne observeres meget store forskelle i gasudsvivningen, specielt for lossepladser med en meget lav gasproduktion. Overordnet set vil gasudsvivningen derfor kunne opdeles i to dele, en kontinuerlig gasudsvivning, der altovervejende styres af overtrykket i lossepladsen (konvektiv transport), og en varierende transport, der styres af de atmosfæriske forskelle (konvektiv transport).

Ved risikovurderingen foretages en samlet vurdering af, i hvilket omfang gasmigrationen vil bevirke, at der forekommer kritiske mængder af lossepladsgas under en bygning.

Bygninger på lossepladsen

For bygninger, der er placeret på det gasproducerende fyldlag, vil der som udgangspunkt altid kunne forekomme kritiske mængder af lossepladsgas under bygningen. For bygninger, der ligger inden for lossepladsens område, men uden for det egentlige gasproducerende område, kan der foretages de samme vurderinger som dem, der foretages for bygninger uden for lossepladsen. Det skal dog vurderes, om fylden under bygningen under ugunstige forhold kan producere gas.

Risikovurderingen af, i hvilket omfang forholdene i jord-/fyldlagene mellem den gasproducerende fyld og bygningen fremmer eller begrænser gasmigrationen, foretages primært ud fra en vurdering af den konvektive gastransport, idet den diffusive transport sandsynligvis kun vil give anledning til horisontal gastransport over forholdsvis kort afstand /9/.

4.4.1 Vurdering af gasfane/kontinuert gasudsivning

Som nævnt ovenfor vil der ske en kontinuerlig gasudsivning fra lossepladsen. I pladser med en kraftig gasproduktion vil gasudsivningen styres af overtrykket i lossepladsen (konvektiv transport). I pladser med et ringe eller ingen overtryk vil den konvektive transport være så ringe, at diffusiv transport som følge af koncentrationsforskelle vil have en betydning for gasudsivningen.

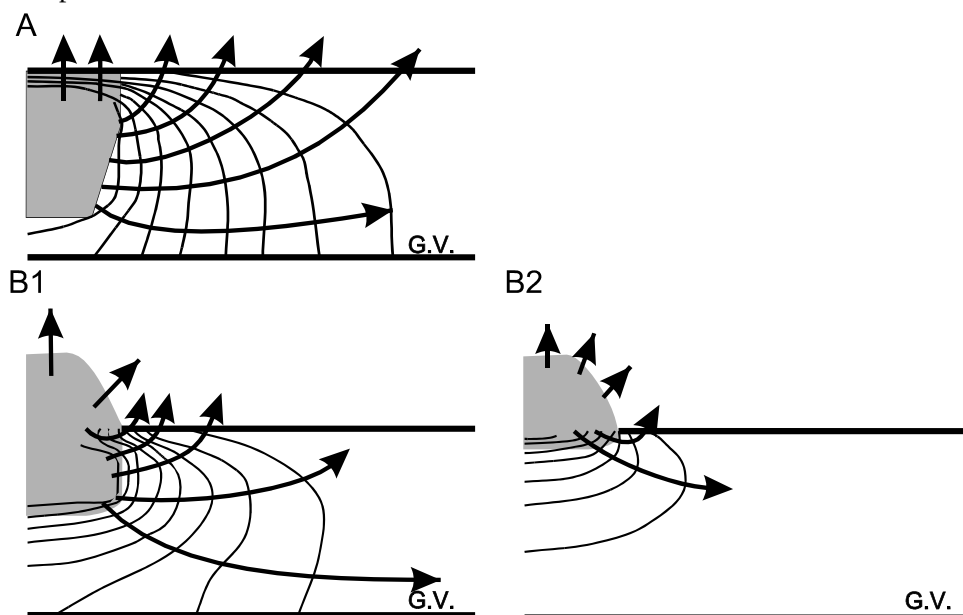
Darcy's lov

Den konvektive transport kan beskrives ved Darcy's ligning (4.5) og er afhængig af gaspermeabiliteten, trykforskellen og afstanden. Desuden vurderes det, at den umættede zones mægtighed har en betydning, ligesom områder med lavpermeabel afdækning eller perioder, hvor porerne i de øvre jordlag lukkes af nedbør, har betydning.

I litteraturen findes kun meget få oplysninger om, i hvor høj grad de enkelte faktorer har indflydelse på gasmigrationen. Undersøgelser ved Skellingsted /11/ viser, at følgende faktorer har stor betydning for den horisontale gasmigration i et givet punkt: Jordlagenes permeabilitet, afstanden fra lossepladsen, vandindholdet i jorden samt metanoxidation. Et overtryk i lossepladsen har ligeledes betydning for den horisontale gasmigration og bevirker, at der konstant sker en gasmigration væk fra lossepladsen.

Lossepladsens udformning vil ligeledes have en indflydelse på gasudsivningen. I figur 4.10 er vist gasudsivningsmønstre ved tre typer af lossepladser. Type A) er "standardlossepladsen", som de fremtidige regneeksempler er baseret på. Denne type losseplads er kendetegnet ved, at opfyldningen er sket under overfladen af det omkringliggende terræn. Denne type af opfyldninger forekommer typisk ved opfyldninger af råstofgrave, vandhuller og lavninger, og er en hyppigt forekommende lossepladstype, specielt blandt de gamle lossepladser. Hvis lossepladsens topafdækning er meget tæt, f.eks. hvis der er benyttet ler til slutafdækningen, eller hvis der er foretaget væsentlig opfyldning over terræn, vil den horisontale gasudsivning fra lossepladsen øges, og lossepladsen vil blive en type B1). Som det kan ses på figur 4.10 er gasopsivningen i nærområdet omkring lossepladsen væsentligt højere for type B1) end for type A), medens gasopsivningen i større afstand fra lossepladsen ikke vil

ændres væsentligt. For type B2, der er en opfyldning, der er sket på terræn, vil gasopsivning udelukkende forekomme i nærområdet omkring lossepladsen.



Figur 4.10 Gasudsivning ved forskellige typer af lossepladser. A) "standardlosseplads", med opfyldning udelukkende under det omkringliggende terræn, B1) losseplads med opfyldning både over og under terræn og B2) losseplads med opfyldning udelukkende over terræn

Gasfanen

Tidligere udførte undersøgelser ved Skellingsted Losseplads (der er en type A losseplads) har vist, at gasmigrationen fra lossepladsen kan måles op til ca. 50 m fra lossepladsen [6]. I pladsen er der målt overtryk på mellem 0,1 hPa og 35 hPa. Geologien omkring lossepladsen består af hovedsageligt mellemgroft sand. Ved vurdering af gasfanen er der taget udgangspunkt i Darcy's lov (ligning 4.5) og resultaterne fra Skellingsted:

$$(4.5) \quad q = -C \frac{k}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \quad (\text{Darcy's lov})$$

I tabel 4.6 er angivet beregnet fluxen af metan i forskellige afstande fra en losseplads ved forskellige gaspermeabiliteter. Til beregningerne er anvendt følgende værdier:

Koncentrationen af metan $C=50\%$ v/v, og
Viskositeten af metan på $\mu=11 \times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$ (jf. tabel 1.1).

Den drivende kraft, trykforskellen Δp , kan fastslås ud fra overtrykket i lossepladsen. I tabel 4.6 er beregningerne foretaget for en losseplads med et overtryk $\Delta p = 10 \text{ hPa}$.

Tabel 4.6 Metanfluxen (q) i forskellige afstande og ved forskellige gaspermeabiliteter udregnet på baggrund af Darcy's lov. Beregningerne er foretaget for en losseplads med et moderat overtryk på ca. 10 hPa

	k (m ²)	L (m)	q (m ³ /m ² h)
Groft sand	2×10^{-11}	5	0,65
		10	0,33
		30	0,11
		80	0,04
		150	0,02
Mellem groft sand	1×10^{-11}	1	1,6
		5	0,33
		10	0,16
		30	0,06
		80	0,02
Fin sand	1×10^{-12}	1	0,16
		5	0,03
		10	0,02
		30	0,01
Moræneler	1×10^{-13}	1	0,016
		5	0,003
		10	0,002
		30	0,001

Ved beregningerne er anvendt $C = 50 \text{ \% v/v}$, $\mu = 11 \times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$ og $\Delta p = 10 \text{ hPa}$

På baggrund af data fra tabel 4.6 og forholdene ved Skellingsted Losseplads, defineres gasfanens udbredelse til den afstand, hvor fluxen er $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Udfra Darcy's lov kan gasfanens udbredelse (L) beregnes efter:

$$(4.6) \quad L = -C \frac{k}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{q} \right) = -C \frac{k}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}} \right)$$

Lukket jordoverflade

I beregningerne efter ligning 4.6 er der taget udgangspunkt i, at jordoverfladen over gasfanen er lukket. Overfladen kan regnes som værende lukket, hvis der f.eks. er udlagt en fast belægning, eller hvis de øvre jordlag har en væsentlig lavere permeabilitet end de underliggende jordlag. Hvis jordoverfladen over gasfanen ikke er lukket, vil fyldhøjden/højden af den umættede zone kun have betydning for gasmigrationen.

I figur 4.10 ses en væsentlig forskel i den horisontale gasudsivning fra lossepladsen af type B1 og B2. Forskellen kan tilskrives forskellen i lossepladsernes fyldhøjde/mægtighed under terræn. Også for typerne A og B1 kan der ses en forskel i den horisontale gasudsivning, som kan tilskrives forskelle i fyldhøjden under terræn. Hvis opfyldningen er foretaget under det sekundære grundvandsmagasin, vil det være højden af den umættede zone, der er bestemmende for omfanget af gasudsivningen.

Reduktionen i gasfanens udbredelse ved forskellige fyldhøjder under terræn/højder af den umættede zone kan beregnes ved hjælp af modelberegninger. Ved en simplificeret 2-dimensional modelberegning fås følgende forhold om gasmigrationen:

Tabel 4.7 Fyldehøjden og højden af den umættede zones betydning for gasmigrationen

Fyldehøjden under terræn/ højden af den umættede zone	Gasfanens udbredelse i procent af afstanden udregnet med lukket jordoverflade
20 m	100 %
15 m	91 %
10 m	87 %
5 m	74 %
2 m	34 %

Metanoxidation

I beregningerne til tabel 4.7 er der ikke taget højde for, at gasmigrationen vil kunne mindskes bl.a. på grund af den metanoxidation, der vil ske i de øvre jordlag. Da metanoxidationen hovedsageligt vil ske i de øvre jordlag, vil højden af den umættede zone også have betydning for, i hvor stort et omfang metanoxidationen kan reducere gasfanens udbredelse. Jo mindre den umættede zone er, jo større betydning vil metanoxidationen have. Metanoxidationen vil have størst betydning for sandede jorde, idet ilten lettest vil kunne trænge ned i jorden i jorder med en høj permeabilitet. Det er derfor kun for jorde med en permeabilitet $k > 10^{-12}$, hvor metanoxidationen medtages ved risikovurderingen, jf. tabel 4.8.

Tabel 4.8 Fyldehøjden/højden af den umættede zone og metanoxidationens betydning for gasfanens udbredelse

Fyldehøjden under terræn/ højden af den umættede zone	Gasfanens udbredelse i procent af afstanden udregnet med lukket jordoverflade (lign. 4.6)	
	uden metanoxidation $k < 10^{-12}$	med metanoxidation $k > 10^{-12}$
20 m	100 %	98 %
15 m	91 %	88 %
10 m	87 %	83 %
5 m	74 %	67 %
2 m	34 %	26 %

4.4.2 Vurdering af ændringer i atmosfæretrykkets indflydelse på gasmigrationen

I det omfang jordoverfladen er lukket vil fald i atmosfæretrykket bevirke en horisontal gasmigration. Mekanismerne bag gasmigrationen er beskrevet i afsnittene 4.2.5 og 5.1.2.2. Med ligning 5.2 er opstillet et udtryk for gasfluxen pr arealenhed til tiden t ved et trykfald, hvor trykket falder med konstant hastighed. Udtrykket gælder for et uendeligt stort reservoir i homogen jord.

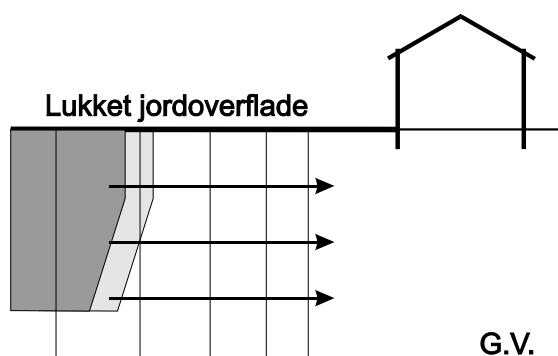
$$(5.2) \quad q = 2a \sqrt{\frac{\varepsilon k}{\mu P_0 \pi}} \sqrt{t},$$

hvor:

- a er hastigheden hvormed trykket falder (Pa/s)
- ε er gasporøsiteten i jorden (m^3/m^3)
- k er gaspermeabiliteten i jorden (m^2)
- μ er viskositeten af metan, 11×10^{-6} N s/ m^2 (Pa s) jf. tabel 1.1
- P_0 er middeltrykket (10^5 Pa)

Ved anvendelse af ligning 5.2 kan man estimere den samlede mængde gas, der transporteres igennem et givent punkt i forbindelse med et lavtryk. Ved at

betragte en 2-dimensional model, hvor gasflowet sker uden dispersion, som vist i figur 4.11, kan man ud fra den samlede gasmængde estimere afstanden, som gassen er transporteret. Dermed kan den maksimale gastransportafstand i forbindelse med lavtrykket estimeres.



Figur 4.11 To-dimensional gasflow i umættet zone

Ved et kraftigt trykfald, hvor trykket falder 1 hPa/time over en periode på 48 timer fås de i tabel 4.9 viste maksimale transportafstande (L).

Tabel 4.9 Gastransportafstand (L) som følge af et kraftigt atmosfærisk trykfald på 1 hPa pr. time i 48 timer

	k (m^2)	L (m)
Groft sand	2×10^{-11}	11
Mellem sand	1×10^{-11}	8
Fin sand	1×10^{-12}	3
Moræneler	1×10^{-13}	1

4.4.3 Samlet vurdering af gasfanens udbredelse

Som nævnt i indledningen i dette afsnit 4.4 skal risikovurderingen af, i hvilket omfang gasmigrationen vil bevirke, at der forekommer kritiske mængder af lossepladsgas under en bygning foretages som en samlet vurdering af den kontinuerlig gasudsivning, der er styret af overtrykket i lossepladsen og den varierende transport, der styres af de atmosfæriske trykforskelle.

Den samlede vurdering af gasfanens udbredelse ($L_{\max}$), og dermed af om der kan forekomme kritiske mængder af lossepladsgas under en bygning, er således summen af den kontinuerte gasudsivning, udregnet i afsnit 4.4.1, og den varierende gastransport, udregnet i afsnit 4.4.2.

Hvis afstanden L mellem lossepladsen og bygningen er i samme størrelsesorden som $L_{\max}$, vil der under ugunstige forhold kunne forekomme kritiske mængder af lossepladsgas under bygningen. Hvis afstanden L er meget mindre end $L_{\max}$, vil der ofte forekomme kritiske mængder af lossepladsgas under bygningen, og hvis afstanden L er meget større end $L_{\max}$ vil der kun yderst sjældent kunne forekomme kritiske mængder af lossepladsgas under bygningen.

Menneskeskabte
migrationsveje

Hvis der mellem lossepladsen og bygningen findes menneskeskabte migrationsveje, f.eks. kloakker, drænledninger eller større el- og gasledninger, kan disse ændre gasmigrationen, og skal derfor inddrages i risikovurderingen. Det

anbefales, at menneskeskabte gasmigrationsveje kun medtages i risikovurderingen, hvis de bevirker at gassen ledes direkte frem til bygningen, dvs. at f.eks. ledningen skal være ført i jorden helt hen til bygningen. Samtidigt skal ledning være ført igennem eller umiddelbart op ad det gasproducerende område, således, at der er skabt en direkte migrationsvej fra det gasproducerende fyld til bygningen.

For de fleste ledningstyper gælder at gastransporten vil ske langs med ledningen i den gruskastning, der er omkring ledningen, men for både kloak og drænledninger gælder, at gassen også kan transporteres inde i selve ledningen. Gastransport langs ledningerne vil specielt kunne ændre gasmigrationsbilledet i jorde med en lav permeabilitet. I situationer, hvor gasmigrationen vil kunne ske langs en ledning, beregnes den maksimale gastransportafstand ($L_{\max}$) som beskrevet for beregning af gasfanens udbredelse, idet der anvendes en gaspermeabilitet som for groft sand. I lossepladser uden overtryk bliver transportafstanden ($L_{\max}$) således 11 meter.

Gastransporten i kloakker eller ikke vandfyldte drænrør vil være langt større, end gastransporten langs rørene. I sådanne tilfælde vil det være nødvendigt at foretage en individuel vurdering.

5 Indtrængning af gas i bygninger

5.1 Gasindtrængning

5.1.1 Indledning

I det følgende beskrives forskellige aspekter vedr. indtrængning af jordluft til huse. Hovedvægten er lagt på trykdreven indtrængning. Hvis der er lossepladsgas i jordluften, svarer dette således til, at indtrængningen af lossepladsgas foregår ved advektion.

Beskrivelsen er inddelt i tre. Første del gennemgår nogle af de faktorer, der er bestemmende for indtrængningen:

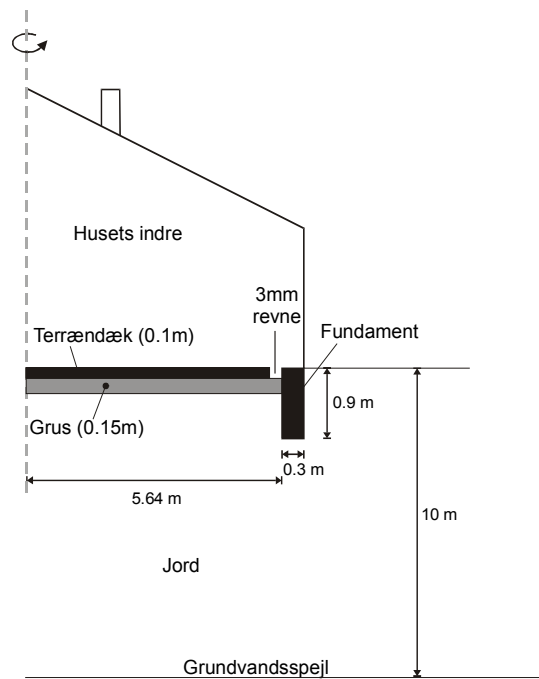
- indendørs-udendørs trykforskelle,
- ændringer i det atmosfæriske tryk,
- revner i husets betondæk,
- kapillarbrydende lag under dækket,
- afstand til grundvandsspejlet, samt
- jordens permeabilitet og porøsitet.

Anden del omhandler målte indtrængningsrater. I den sidste del sammenfattes betragterne i relation til risikovurderingen for lossepladsgas.

Mange af betragtningerne bygger på erfaringer fra radon. Dette skyldes, at der er foretaget radonmålinger i et relativt stort antal huse. Det er af betydning, da radon er en naturligt forekommende radioaktiv gas, som findes i høje koncentrationer under de fleste danske huse. Typisk er radonkoncentrationen i poreluften 10.000 gange højere end koncentrationen i udeluft. Radon er således en god sporgas for identifikation af jordluftindtrængning.

For at anskueliggøre betydningen af de forskellige faktorer er der foretaget numeriske modelberegninger for huset i figur 5.1. Huset er et idealiseret 100 m² terrændækhuse. Som udgangspunkt har huset et højpermeabelt kapillarbrydende lag under terrændækket, og der er 10 meter til grundvandsspejlet. Tilsvarende antages det, at der er en 3 mm revne mellem terrændækket og ydermuren. Revnen omfatter altså hele husets omkreds. Her kan jordluften trænge ind i bygningen. Selve betondækket antages at være helt tæt og uden revner. Andre detaljer fremgår af figuren. Beregningerne er foretaget med modellen RnMod3d, som er udviklet på Risø /12/.

Det skal fremhæves, at modelberegningerne udgør en meget idealiseret repræsentation af de faktiske forhold. Herunder er det værd at bemærke, at der ikke tages hensyn til inhomogeniteter og sprækker i jorden (f.eks. på moræneler) eller anisotropi for gaspermeabiliteten.

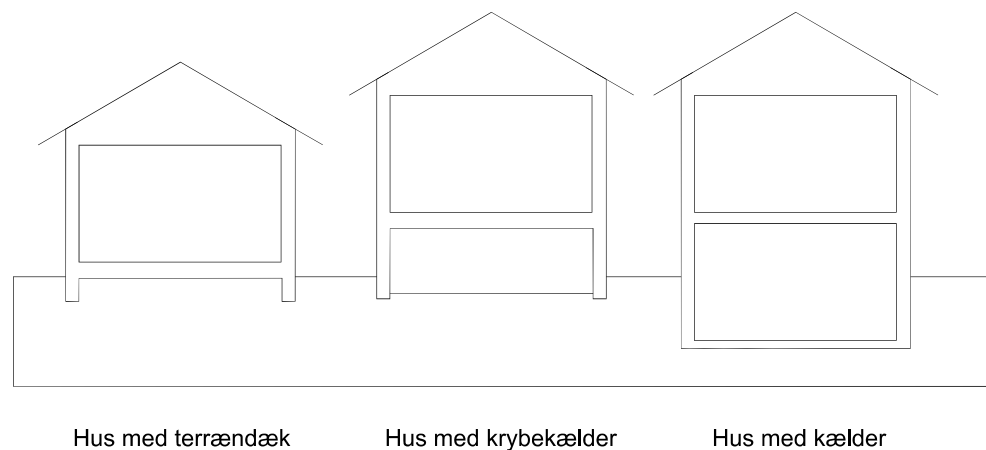


Figur 5.1 Skitse af det hus, som anvendes i modelberegningerne. I standardkonfigurationen er der en 3 mm revne mellem terrændæk og ydervæg. Jorden antages at være homogen med 0,3 porøsitet og uden fugt. Under dækket findes der et kapillarbrydende gruslag med en permeabilitet på $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Huset er cirkulært med en radius på 5,64 m. Det svarer til at huset har et totalt gulvareal på 100 m^2 . Tegningen er ikke mål fast

5.1.1.1 Byggetekniske grundbegreber

I Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om undersøgelser af lufttæthed i bygningskonstruktioner /32/ er givet en detaljeret gennemgang af mulighederne for jordluftens indtrængning i bygninger. I det følgende vil der blive givet en kort beskrivelse af de byggetekniske begreber, der er anvendt i nærværende rapport, men for detaljeret information henvises til Bygge- og Boligstyrelsens vejledning /32/.

Ved vurderingen af gasindtrængningen i bygninger, kan bygningerne opdeles i tre hovedkategorier som vist i figur 5.2.



Figur 5.2 Inddeling af bygninger i tre hovedkategorier

Terrændæk

Modelhuset, som er benyttet ved beregningerne i dette afsnit, er et forholdsvis simpelt hus, med et terrændæk af beton, der hviler på et kapillarbrydende lag. Et terrændæk består oftest af en betonplade, som enten hviler direkte på jorden (meget simpelt byggeri), eller som ligger over et isolerende lag og et kapillarbrydende lag. Huset er uden kælder eller krybekælder. Mange parcelhuse er opført som huse med terrændæk.

Selve den bærende del i et terrændæk er oftest en ca. 10 cm tyk betonplade udstøbt efter udførelsen af husets fundamenter for ydervægge og andre bærende vægge. Betonen armeres i tilstrækkelig omfang til at undgå væsentlig revnedannelse, men udføres også i nogle tilfælde med ingen eller så lidt armering, at revnedannelser alligevel forekommer. Over betongulvet udlægges ofte en gulvbelægning (f.eks. tæppe, linoleum eller parket), hvorfor det kan være svært at få vished om der er revner i terrændækket, og hvor store de er. I bygninger med terrændæk vil der typisk ses revner langs fundamentet for ydervæggene, idet terrændækket trækker sig lidt sammen på grund af svind og krybninger i betonen, hvorved der fremkommer en 3-5 mm spalte/revne langs alle ydervægge. Utætheder i terrændækket vil også typisk forekomme ved rør- og ledningsgennemføringer.

Kapillarbrydende

Under terrændækket befinder sig ofte et varmeisoleringsslag, der kan bestå af mineraluld, skumplastisolering, letklinker eller Lecanødder samt et gruslag/singelslag/kapillarbrydende lag, der skal sikre, at vand fra undergrunden ikke kapillært (hårrørvirkning) suges op i betonen. Det kapillarbrydende lag består af grus med så store korn, at vand ikke kan suges op, men denne kornstørrelse giver samtidig mange små hulrum og giver derfor en meget fin fordelingsmulighed for eventuel optrængende gas.

Radon tæt byggeri

Nyere terrændæk skal ifølge Bygningsreglementet være helt tætte og jf. Radonvejledningen udføres med fleksible membraner langs kanterne. Huse, der er 10 år gamle eller ældre, er ikke opført efter det ovenfor nævnte reglement og vejledning, og må derfor ofte betegnes som "utætte" mod undergrunden.

Krybekælder

I nogle typer bygninger er gulvkonstruktionen hævet op fra jorden, og der er etableret et mindre hulrum mellem gulvet og jordoverfladen. Dette hulrum betegnes i denne rapport som en krybekælder, uanset om det er muligt for en person at kunne krybe ind i hulrummet eller ej.

Krybekældrene er normalt etableret som ventilerede hulrum. Ventilationen foretages ofte gennem riste i siden på fundamentet, men da ristene kan være lukkede eller stoppet til kan ventilationen i krybekældrene være meget dårlig. Nogle krybekældre er anlagt med et bunddæk, medens krybekælderen i specielt ældre huse kan være anlagt uden bunddæk. Bunddækket i krybekældrene er ofte af en dårligere kvalitet, end terrændækket, og yder derfor en ringere beskyttelse mod gasindtrængning.

Mulighederne for gasindtrængning fra jorden til krybekælderen, og fra krybekælderen gennem gulvet til bygningen er de samme som for terrændækket, typisk vil utætheder kunne forekomme i forbindelse med revner og

sprækker i dækket/gulvet, utætheder langs fundamentskanter og ved rør- og ledningsgennemførelser.

Kælder

I bygninger med kælder vil gulvkonstruktionen i kælderen ofte minde om opbygningen af terrændækket. Væggene i kælderen kan dog have en noget anderledes opbygning, der vil f.eks. ikke være noget kapillarbrydende lag. Ved nogle bygninger er der etableret et dræn på ydersiden af kældervæggen, for at holde denne tør. Drænet vil i lighed med det kapillarbrydende lag kunne fordele poreluften langs kældervæggen, og derved lede luften hen til revner og sprækker i væggen. Drænet er dog i modsætning til det kapillarbrydende lag ført op over terræn, og står derfor i kontakt med atmosfære luften. Drænet vil derfor også kunne bevirke at poreluften under trykfald i atmosfæren kan ledes til overfladen, og at atmosfærisk luft under trykstigninger i atmosfæren vil ledes ned langs kældervæggen.

Mulighederne for gasindtrængning fra jorden til kælderen, og fra kælderen gennem gulvet til stueetagen er de samme som for de øvrige bygningstyper, dog vil poreluften også kunne sive ind i kælderen gennem utætheder i kældervæggen, f.eks. i forbindelse med rør- og ledningsgennemførelser.

5.1.2 Faktorer af betydning for gasindtrængning

5.1.2.1 Indendørs-udendørs trykforskelle

Indendørs-udendørs temperaturforskelle, vind og drift af mekaniske ventilationsanlæg frembringer normalt et lille undertryk af størrelsesordenen 1 til 3 Pa i forhold til den omgivende atmosfære /13/ /14/. Undertrykkets størrelse varierer igennem døgnet (normalt med maksimum tidligt om morgenen) og igennem året (normalt med maksimum om vinteren).

Denne trykforskel giver anledning til at jordluft suges ind i huset. Typiske værdier for indtrængningsraten til et almindeligt dansk enfamiliehus formodes, at være omkring 0,1 til 1 m³ per time. Dette strømningsfelt danner en zone i jorden umiddelbart under og omkring huset. Zonen kan kaldes for husets indflydelseszone, idet man som udgangspunkt kan påregne, at enhver gaskomponent (f.eks. lossepladsgas, VOC'er eller radon), som af en eller anden grund kommer ind i denne zone, vil blive ført ind i huset af gasstrømningen /15/.

Indtrængningsraten er proportional med undertrykkets størrelse. Hvis der kommer 1 m³/time ind i huset ved 1 Pa, så vil indtrængningen stige til 3 m³/time ved 3 Pa.

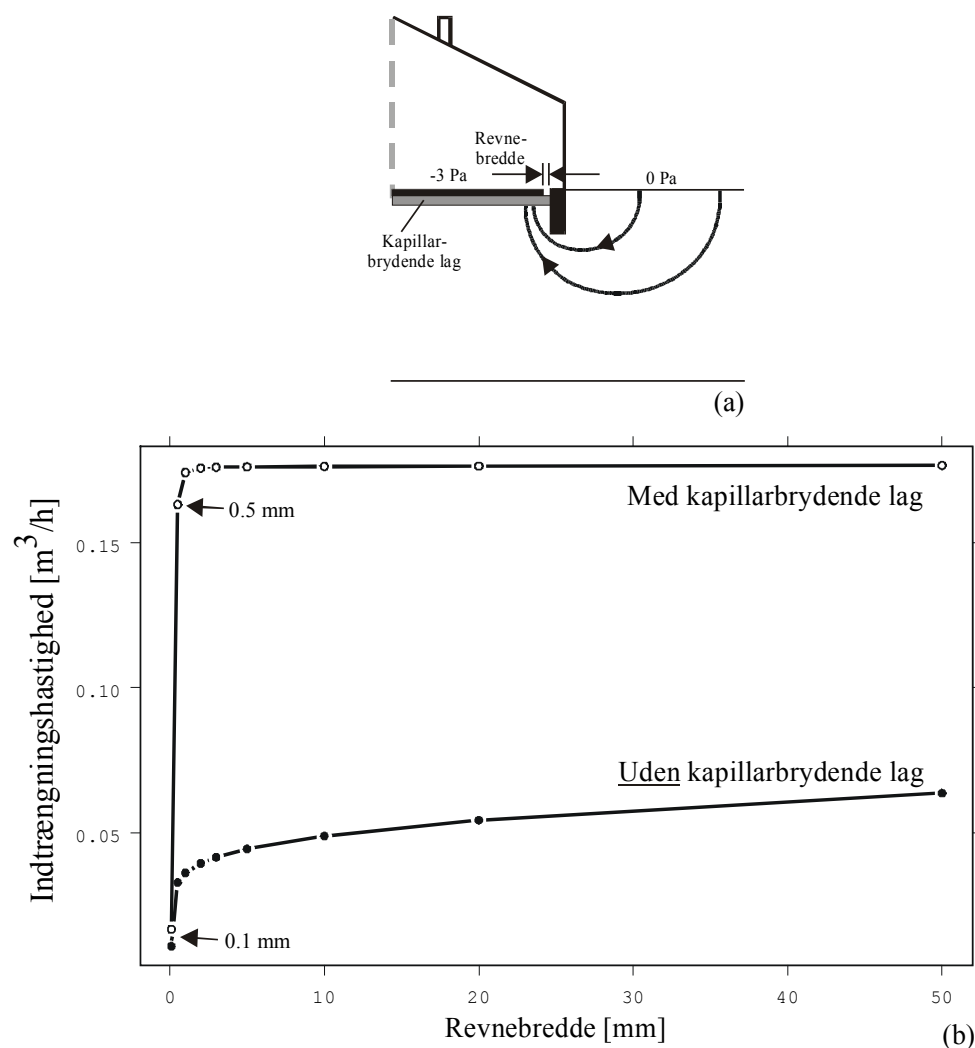
Indtrængningsraten stiger med jordens gaspermeabilitet. Modelberegninger for huset i figur 4.1 viser, at for en indendørs-udendørs trykforskel på 3 Pa vil jordluftindtrængningen være omkring 1,6 m³/time ved 10⁻¹⁰ m², 0,18 m³/time ved 10⁻¹¹ m², og 0,018 m³/time ved 10⁻¹² m². Der er ikke direkte proportionalitet mellem jordens gaspermeabilitet og indtrængningen, da permeabiliteten for det kapillarbrydende gruslag ikke er uendelig stor.

Det kapillarbrydende lag og antallet af revner i betondækket spiller også en rolle for jordluftindtrængningens størrelse. Dette er illustreret i figur 5.3, hvor der er gennemført beregninger med og uden et højpermeabelt gruslag under

dækket. Jordens gaspermeabilitet er sat til 10^{-11} m². For begge konfigurationer er gasindtrængningen beregnet som funktion af bredden af revnen mellem dæk og ydermur. Revnebredden går fra 50 til 0,1 mm. Det ses, at der er en stærk ulineær sammenhæng mellem revnebredde og gasindtrængning. Indtrængningen er således stort set den samme uanset om revnen er 50 eller 1 mm bred. Først når revnen kommer under en brøkdels af en mm begrænses indtrængningen væsentligt. Det fremgår desuden, at det kapillarbrydende lag spiller en vigtig rolle for indtrængningen: Ved en revnebredde på 50 mm giver det kapillarbrydende lag anledning til en tredobling af indtrængningen relativt til situationen uden et sådant lag. Det er på den baggrund klart, at permeabiliteten af det kapillarbrydende lag og jorden umiddelbart under huset er afgørende for luftindtrængningen.

Det må formodes, at betydningen af det kapillarbrydende lag er endnu større i virkeligheden end beskrevet ovenfor. Det skyldes, at jorden ikke er homogen (men f.eks. opsprækket) og at revnerne i betondækket er spredt over gulvarealet. I sådanne tilfælde vil det kapillarbrydende lag tilvejebringe en god kobling mellem særligt hurtige transportveje i dækket og i jorden.

Eksperimentelle undersøgelser og modelberegninger /16/ har vist, at hvis man betragter mindre revner eller huller i betondækket (fremfor en enkelt sammenhørende revne langs dæk og ydermur som i figur 5.3), da vil indtrængningen til et hus uden kapillarbrydende lag stort set være proportional med det samlede lækareal af revner. For et sådant hus vil indtrængningen altså direkte afhænge af antallet og størrelsen af revnerne. For huse med et kapillarbrydende lag vil lækarealet derimod være uden betydning (svarende til den øverste kurve i figur 5.3) hvis dækket blot er "punkteret" et enkelt sted. For sædvanlige danske huse med kapillarbrydende lag kan man altså ikke forvente, at indtrængningen af jordluft kan begrænses væsentligt ved at tætnes dækket med mindre man effektivt stopper alle utætheder.



Figur 5.3 Beregning af indtrængning af jordluft til modelhuset i figur 4.1 når der er et konstant 3 Pa undertryk i huset i forhold til omgivelserne. Der er gennemført beregninger for revnebredderne: 50, 20, 10, 5, 3, 2, 1, 0,5 og 0,1 mm. Jorden antages at være homogen med en permeabilitet på 10^{-11} m^2 . Der er 10 m til grundvandsspejlet

5.1.2.2 Ændringer i atmosfæretrykket

Det er velkendt bl.a. fra sikkerhedskrav for arbejde i lukkede rum, at fald i det atmosfæriske tryk kan medføre indtrængning af giftig/iltfattig gas og således forårsage kvælningssulykker. Der foreligger også feltnmålinger, som viser, at der kan komme udgasninger fra jordoverfladen, når trykket falder. Derimod er det mindre godt belyst, hvordan sådanne trykfald påvirker indtrængningen af jordgas til huse.

Det atmosfæriske tryk varierer på forskellige tidsskalaer (fra sekunder til dage, se afsnit 3.2.4). Sådanne trykændringer udbreder sig diffusivt i jorden med udbredelsestider, som afhænger af jordens porøsitet og permeabilitet. Jorden reagerer ikke på ændringer, som er "for hurtige". Jordens responstid T kan beregnes som:

$$(5.1) \quad T = \frac{L^2 \mu \varepsilon}{k P_0}$$

hvor: L er den vejlængde trykket skal udlignes over (f.eks. afstanden fra jordoverfladen til grundvandsspejlet) (m)
 μ er den dynamiske viskositet (18×10^{-6} Pa s)
 ε er jordens porøsitet (m^3/m^3)
 P_0 er middeltrykket (10^5 Pa)
 k er jordens gaspermeabilitet (m^2).

Med $L = 2\text{m}$ og $\varepsilon = 0,3$ er T omkring 6 timer for en permeabilitet på 10^{-14} m^2 og omkring 2 sekunder for 10^{-10} m^2 .

Efter et fald i det atmosfæriske tryk er der overtryk i gasreservoir i jorden under huset. Gassen ekspanderer indtil trykket er udlignet. Jo større reservoir, jo større gasstrømning. Dvs. at gasstrømningen stiger med jordens porøsitet og afstand til grundvandsspejlet. For et uendeligt stort reservoir i homogen jord med porøsitet ε og gaspermeabilitet k vil et jævnt trykfald (f.eks. 1 hPa per time) som starter kl. $t=0$ give anledning til en udgasningshastighed (i m^3/sek per m^2 overfladeareal) fra jorden lig:

$$(5.2) \quad q = 2a \sqrt{\frac{\varepsilon k}{\mu P_0 \pi}} \sqrt{t}$$

hvor: a er hastigheden hvormed trykket falder i Pa/s /17/.

Det ses, udgasningshastigheden vokser med tiden. Det skyldes, at større og større dele af reservoiret bidrager til ekspansionen efterhånden, som trykket forplanter sig igennem jorden. For et endeligt reservoir (f.eks. jord som nedadtil er begrænset af et grundvandsspejl) vil udgasningshastigheden vokse til en vis maksimalværdi.

Det maksimale flow (m^3/time) fra et reservoir under et trykfald er:

$$(5.3) \quad Q = \frac{LA\varepsilon a}{P_0}$$

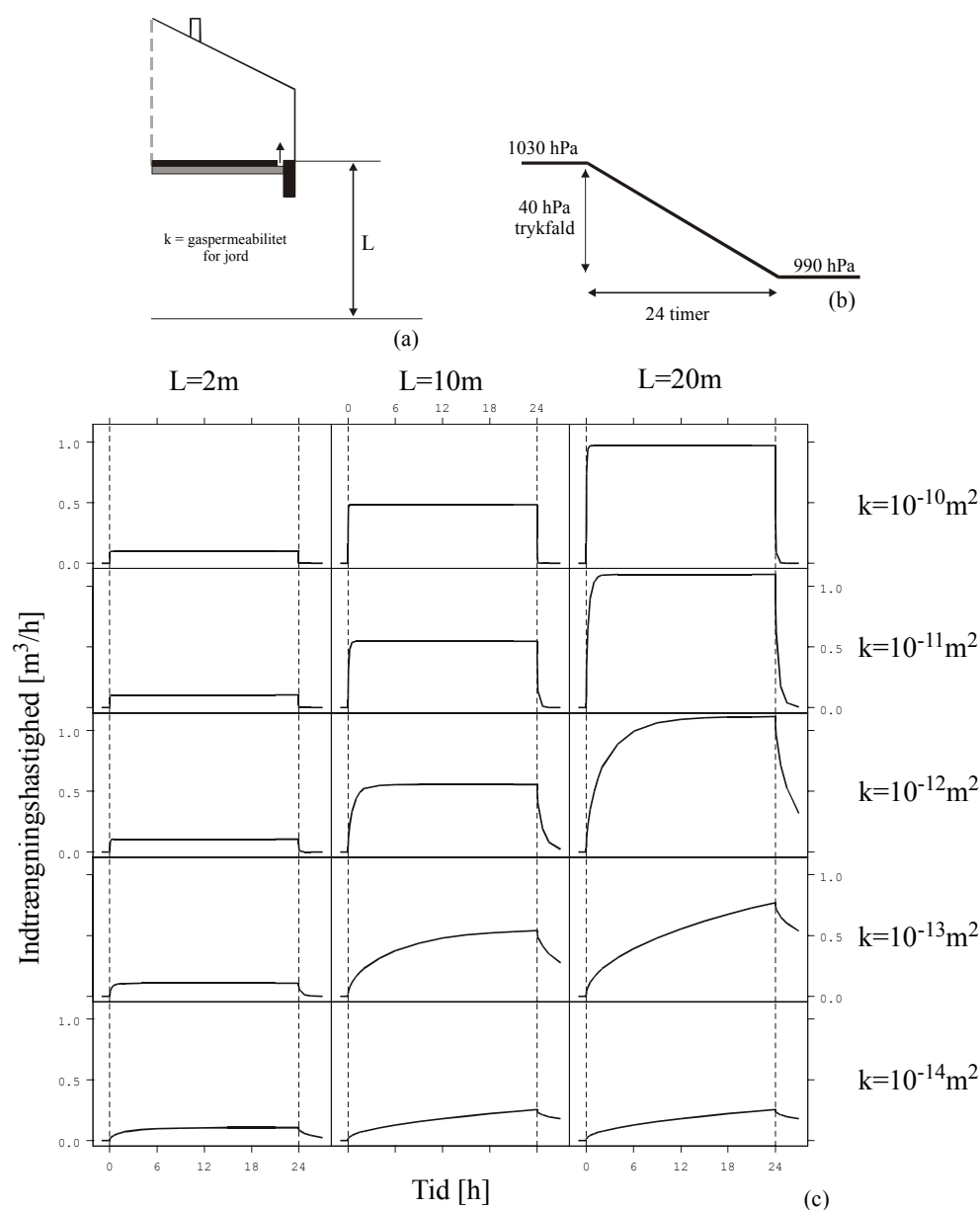
hvor: L er afstanden til grundvandsspejlet (m)
 A er det betragtede overflade areal (m^2)
 ε_α er luftporøsiteten (m^3/m^3)
 a er hastigheden hvormed trykket falder (Pa/time)
 P_0 er middeltrykket (Pa)

For at vurdere betydningen af længerevarende trykfald er der gennemført modelberegninger for huset i figur 5.4(a). Det antages, at trykket (efter at havde været konstant i lang tid) falder jævnt med 40 hPa (altså 40 mbar) over en periode på 24 timer. Derefter er trykket igen konstant. Trykkets tidsmæssige forløb er vist i figur 5.4(b). Der er gennemført beregninger for indtrængning af jordgas til huset for forskellige afstande til grundvandsspejlet og forskellige gaspermeabiliteter. I alle tilfælde er der et kapillarbrydende lag under huset, og en 3 mm revne mellem dæk og ydervæg. Resultaterne fremgår af figur 5.4(c).

Det ses, at indtrængningshastigheden vokser fra 0 op til en maksimalværdi, som primært er karakteristisk for, hvor dybt grundvandsspejlet ligger. Jo dybere grundvandsspejl, jo større indtrængning. For 20 m til grundvands-

spejlet er maksimalværdien omkring 1 m³/time. For 10 m er maksimalværdien omkring 0,5 m³/time.

Gaspermeabiliteten har primært betydning for, hvor hurtigt maksimalværdien opnås. Det ses af figuren, at hvis der er 10 m eller mere til grundvandsspejlet, og hvis jordens gaspermeabilitet er under 10⁻¹³ m², da opnås maksimalværdien ikke indenfor de 24 timer, som trykfaldet varer.



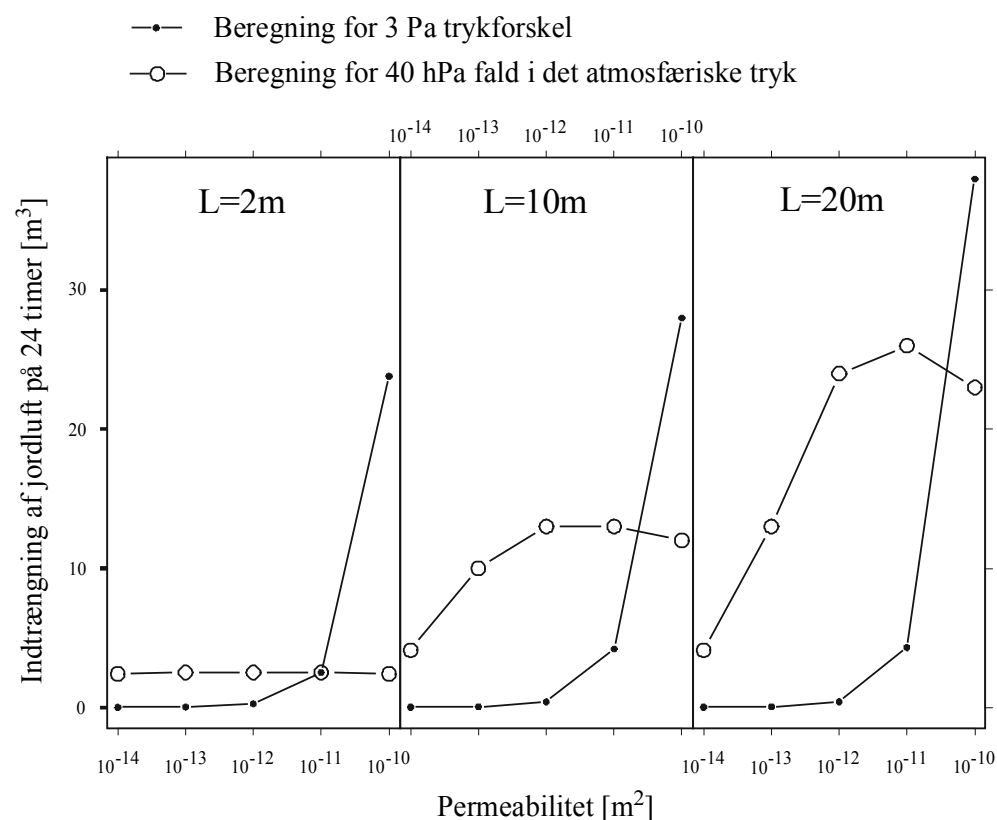
Figur 5.4 Modelberegning af indtrængningen til modelhuset, når det atmosfæriske tryk falder jævnt med 40 hPa over 24 timer. Der er gennemført beregninger for tre afstande til grundvandsspejlet: 2, 10 eller 20 m og 5 permeabilitet for jorden: 10⁻¹⁴, 10⁻¹³, 10⁻¹², 10⁻¹¹ og 10⁻¹⁰ m². Resultaterne for hver af de femten kombinationer fremgår af (c). Jordgassen kommer ind i huset via en 3 mm revne

5.1.2.3 Sammenligning mellem drivkræfterne

Robinson et al. /18/ har foretaget en sammenligning mellem gasindtrængning som følge af periodiske ændringer af atmosfæretrykket og konstante indendørs-udendørs trykforskelle. Sammenligningen viser, at atmosfæretrykket dominerer som en drivkraft for lave permeabiliteter. For høje permeabiliteter er det derimod den indendørs-udendørs trykforskel, som er vigtigst.

I det følgende foretages en sammenligning mellem gasindtrængning som følge af atmosfæretrykfaldet vist i figur 5.5(b) (trykfald på 40 hPa over 24 timer) og en konstant indendørs-udendørs trykforskel på 3 Pa, som beskrevet afsnit 5.1.2.1.

Figur 5.5 viser den gasmængde, som tilgår modelhuset over 24 timer fra de to drivkræfter. Eksempelvis ses det, at for en gaspermeabilitet på 10^{-10} m^2 og 2 m til grundvandsspejlet, da vil atmosfæretrykfaldet betyde, at der kommer omkring $2,4 \text{ m}^3$ jordluft ind i huset. Til sammenligning vil en indendørs-udendørs trykforskel på 3 Pa forårsage en indtrængning på omkring 24 m^3 over de 24 timer.

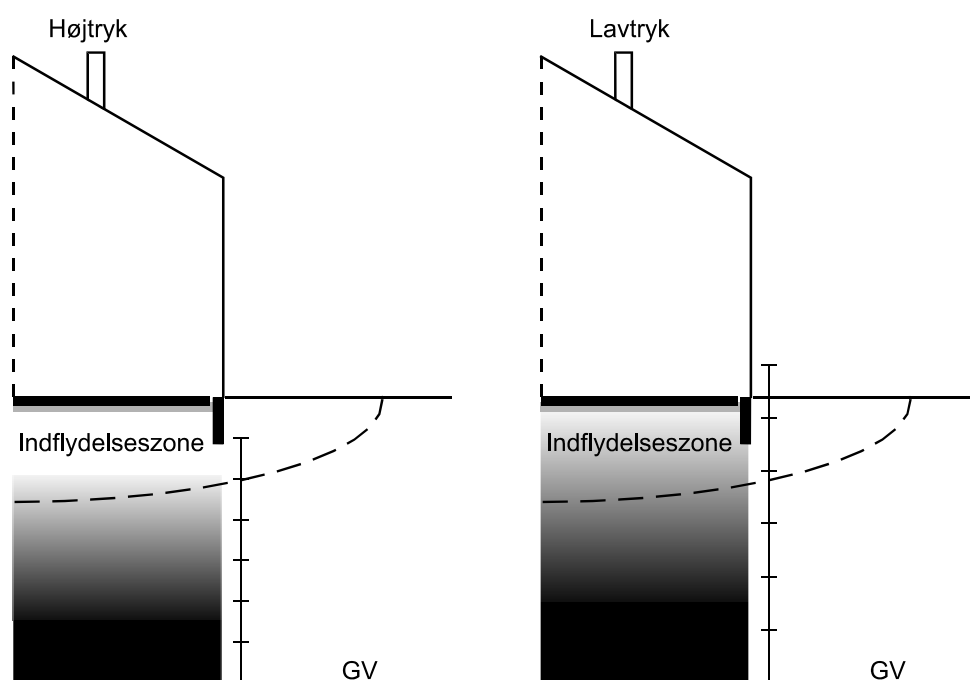


Figur 5.5 Beregning af det hvor meget jordluft, som trænger ind i modelhuset over en periode på 24 timer som følge af enten: (1) et jævnt 40 hPa trykfald eller: (2) et konstant undertryk i huset på 3 Pa. Beregningerne er gennemført for 2, 10 og 20 m til grundvandsspejlet samt for forskellige permeabiliteter

Det ses, at for permeabiliteter på 10^{-10} m^2 (eller derover) er indtrængningen i alle tilfælde væsentligt højere for den 3 Pa indendørs-udendørstrykforskel sammenlignet med atmosfæretrykfaldet. I sådanne tilfælde er ændringer i atmosfæretrykket altså af marginal betydning. Dette gælder derimod ikke for jord med lavere permeabilitet. For jorde med en permeabilitet på 10^{-11} m^2

(eller derunder) viser modelberegningerne, at ændringer i atmosfæretrykket kan være en væsentlig drivkraft i forhold til indendørs-udendørstrykforskelle.

Det skal bemærkes, at ovenstående sammenligninger ikke tager hensyn til, hvorfra den indtrængende jordluft kommer. For den konstante 3 Pa trykforskel er det et bestemt jordvolumen mellem huset og jordoverfladen, som gennemskyldes med en given hastighed (indflydelseszonen). Hvis man tilfører lidt lossepladsgas til dette volumen, vil denne gas før eller siden komme ind i bygningen. For faldet i det atmosfæriske tryk er situationen anderledes. Her beror strømningen på en ekspansion af jordluften i reservoiret under huset. Ved et givet trykfald på f.eks. 30 hPa udvider jordluften sig med ca. 3 %. For dybereliggende dele af reservoiret giver denne ekspansion kun anledning til et lille flow, men for de øvre jordlag vil flowet øges, da det også vil være påvirket af flowet fra de dybere liggende lag. For lossepladsgas, der befinder sig i den nederste del af reservoiret, vil faldet i det atmosfæriske tryk kun give anledning til, at lossepladsgassen bringes lidt opad, som forsøgt illustreret i figur 5.6, og lossepladsgassen vil ikke automatisk blive bragt ind i huset. Som det kan ses af figur 5.6, vil det kun være lossepladsgas, som befinder sig i den øverste del af reservoiret, der kommer ind i indflydelseszonen, og som dermed vil kunne sive ind i bygningen.



Figur 5.6 Illustration af jordgassens udvidelse under et lavtryk. Poreluften i den dybereliggende del af reservoiret (den mørke del) vil blive i bunden af reservoiret, medens poreluften i den øvre del af reservoiret (den lyse del) presses op og ud af jorden

5.1.2.4 Andre drivkræfter

Der findes også andre drivkræfter end atmosfæretryksændringer og indendørs-udendørstrykforskelle.

Pga. gasdannelse i lossepladsen har denne ofte et overtryk i forhold til omgivelserne. Et overtryk op til 20 hPa er normalt for lossepladser med

lavpermeabel top /1/. Dette overtryk er vigtig ved selve gasspredningen (fra losseplads mod hus), men det kan også hjælpe med til (1) at lossepladsgassen direkte presses ind i nærvedliggende huse eller (2) at den presses så tæt på huset, at dettes eget undertryk kan bringe gassen ind.

Fra numeriske modelstudier vides det, at varmetabet fra en kældervæg kan give anledning til konvektionsstrømme i jorden omkring huset. Dette kan medføre ændringer i strømningsfeltet i jorden under huset /19/ således, at den jordgas, som tilgår huset, kommer fra dybereliggende jordlag.

Vha. numeriske modelberegninger er det påvist, at vindinducerede trykfelter på jordoverfladen omkring et hus kan medføre betydelige ændringer af strømningen af jordgas under huset /20/ /21/. Dermed kan jordgasindtrængningen til huset også ændres. Under en storm kan jorden under et hus ventileres. Fænomenet er eksperimentelt påvist.

5.1.2.5 Indtrængningssteder

De vigtigste steder for trykdriven indtrængning af jordluft er støbeskel mellem gulvkonstruktion og væg (typisk 1 til 3 mm revnebredde) og andre revner og sprækker i grænsefladen mod jorden f.eks. omkring eller igennem afløbsrør (særligt hvis vandlåsen er udtørret eller ikke-eksisterende) eller andre installationer. Desuden kan jordluft komme ind via hulmure.

I forbindelse med en risikovurdering for lossepladsgas til et hus skal det nævnes, at jo mere koncentreret indtrængningen foregår (f.eks. igennem en enkelt revne) jo større er sandsynligheden for at have en gassamling med en metankoncentration over det kritiske niveau. Modsat vil en mere diffus indtrængning over et stort areal lettere opblandes med husets almindelige rumluft.

5.1.2.6 Separation

Det er uvist, om indtrængningsprocessen kan give anledning til en separation mellem metan og lossepladsgassens andre komponenter således, at metanindholdet indendørs kan bringes over niveauet i den "oprindelige" jordluft. Fysisk findes der umiddelbart tre egenskaber, som kan føre til en sådan separation af gassens enkeltkomponenter: (i) forskelle i opløslighed, (ii) forskelle i densitet, og (iii) forskelle i diffusivitet.

Det vurderes, at separation kun i meget sjældne tilfælde vil kunne have betydning for de risici der kan opstå i forbindelse med gasindtrængningen.

5.1.3 Målinger af jordluftindtrængningen

5.1.3.1 Direkte målinger

Udenlandske målinger viser, at indtrængning af jordluft kan udgøre mere end 20 % af husets samlede lufttilførsel (dvs. husets almindelige ventilationsluft). På Risø er der foretaget målinger på to små testhuse, som skaleret til et almindeligt enfamiliehus ville svare til en jordluftindtrængning på 0.45 til 1,6 m³/time (eller 0,3 til 1 % af husets udelufttilførsel under normale forhold) /23/.

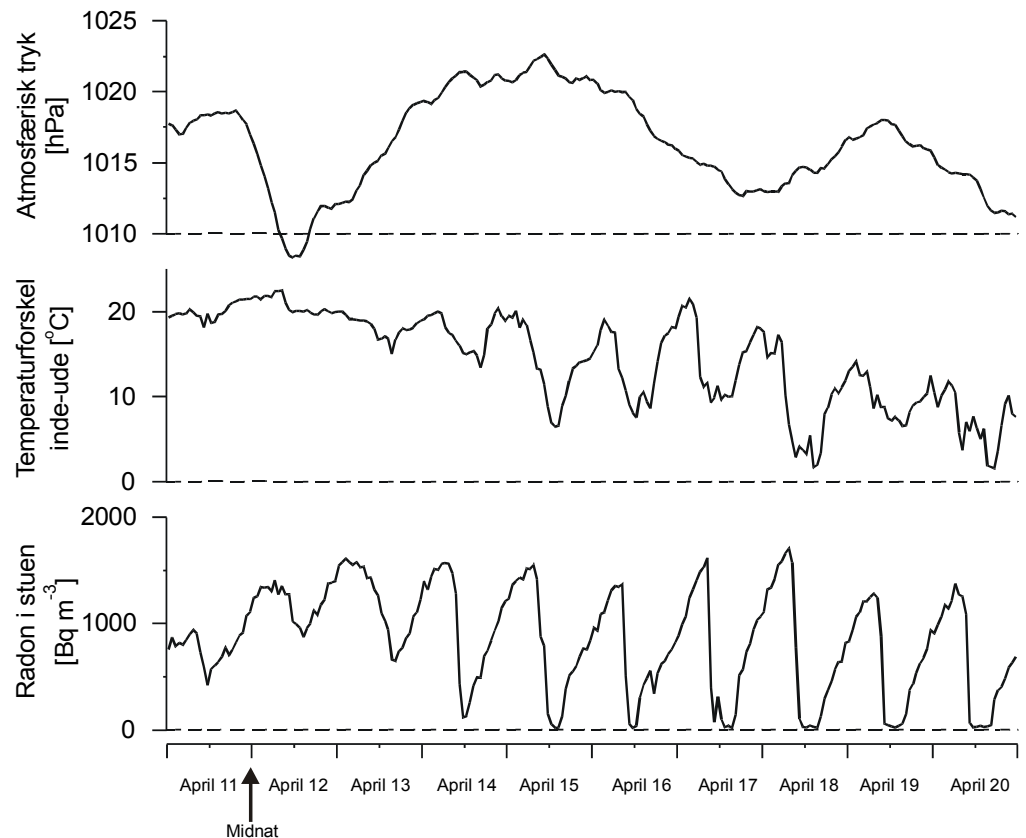
Der foreligger i ét tilfælde en direkte måling af jordgasindtrængning til et hus, som følge af ændringer i atmosfæretrykket /24/. I dette tilfælde var det dog ikke store vedvarende trykfald (se afsnit 4.2.2), som blev behandlet. Det kunne vises, at små hurtige fluktuationer i atmosfæretrykket (amplitude 10 Pa og periode ca. 20 min) var en vigtig drivkraft for jordgasindtrængning. Over en 5-dags periode gav oscillationerne anledning til en indtrængning svarende til en konstant indendørs-udendørs trykforskel på 0,5 Pa. Der blev der målt momentane indtrængningshastigheder på op til 0,12 m³ per time som respons på ændringshastigheder af atmosfæretrykket fra 0 til 5 Pa pr. minut.

Ændringer i atmosfæretrykket er påvist som en drivmekanisme for metanindtrængning til canadiske huse /25/.

5.1.3.2 Vurderinger ved hjælp af radon

Det er muligt at vurdere jordluftindtrængningen i danske boliger ud fra radonmålinger i det indendørs miljø.

Figur 5.7 viser det tidlige forløb af radonkoncentrationen i et dansk hus. Atmosfæretrykket og forskellen i temperatur mellem inde og ude er også vist. Den eneste væsentlige kilde til radon i huset er jorden under huset. Det ses, at radonkoncentrationen varierer betydeligt igennem døgnet. Variationerne skyldes ændringer i husets luftskifte og ændringer i indtrængningshastigheden af radon fra jorden. Variationerne følger stort set ændringerne i indendørs ÷ udendørs temperatur og dermed den lille forskel i tryk mellem inde og ude. Radonkoncentrationen er maksimal i de tidlige morgentimer. Indtrængningen af radon forekommer ikke at være påvirket af ændringerne i atmosfæretrykket. Eksempelvis tilgår der store mængder radon til huset selv om atmosfæretrykket er stigende. Tilsvarende observationer er gjort ved kontinuerlige målinger i andre huse i Danmark.



Figur 5.7 Tidsforløb af radon i stuen, indendørs-udendørs temperaturforskel og atmosfæretryk. Målingerne er fra april 1996, og stammer fra det såkaldte Radon-95 projekt /16/. Den eneste væsentlige kilde til radon i huset er jorden under huset. Radon-koncentrationen en meter under terræn blev målt til 60-100 kBq/m³. En efterfølgende afværgelsesning (baseret på aktivt sug under terrændæk) bragte husets årsmidlede radonniveau ned fra omkring 1000 til 50 Bq/m³

For et normaltventileret dansk enfamiliehus uden særlige byggematerialer må indendørs radonkoncentrationer over 30-40 Bq/m³ tolkes som en sikker indikation af, at der tilgår jordluft til huset. Som for lossepladsgas kan indtrængningen af radon ske diffusivt igennem husets gulvkonstruktion eller advektivt igennem revner og sprækker. Der findes ingen sikker bestemmelse af den relative betydning af diffusiv og advektiv indtrængning af radon til danske huse. Ud fra modelberegninger og udenlandske undersøgelser formodes det dog, at advektion er den vigtigste indtrængningsmekanisme (i hvert fald for huse med høje radonniveauer). Formodningen understøttes af, at radonindtrængningen til et bestemt hus i det såkaldte Radon-95 projekt ikke blev væsentligt ændret af, at 70 % af husarealet blev overdækket med en diffusionstæt membran /26/.

I de følgende antages det, at den diffusive indtrængning kan negligeres således, at radonindtrængningen J (Bq/time) i princippet kan findes som:

$$(5.4) \quad J = cQ$$

hvor: c er jordluftens radonkoncentration ved indtrængningsstedet (Bq/m³)
 Q er strømningshastigheden for jordluften (m³/time).

I en dansk undersøgelse blev der målt radon og luftskifter i 117 nyere danske terrændækhuse med naturlig ventilation /27/. Målinger over 7 til 25 dage gav radonkoncentrationer fra omkring 10 til 600 Bq/m³. For hvert hus blev der foretaget en beregning af, hvor meget radon, der skal tilføres for at opretholde den målte radonkoncentration. Fra disse målinger fratrækkes et bidrag på 3,9 kBq/h, som svarer til den vurderede maksimale radonafgasning fra byggematerialer (3,0 kBq/time) og indtrængning af radon fra udeluften (0,9 kBq/h). De således korrigerede målinger svarer til den radon, der kommer fra jorden. I gennemsnit er radonindtrængningsraten fra jorden lig 8,9 kBq/h.

For videre at estimere, hvor meget jordluft der trænger i husene, er det nødvendigt at kende koncentrationen af radon i jordluften. Desværre foreligger der ikke sådanne målinger, men da målingerne foregik i "morænelers amter", må det forventes, at den maksimale radonkoncentration i jordluften er fra 30 til 120 kBq/m³ med en typisk værdi omkring 60 kBq/m³. På grund af strømningsforholdene omkring et hus må det forventes, at radonkoncentrationen ved indtrængningspunktet er lidt lavere /12/; eksempelvis 50 kBq/m³. På dette grundlag kan den gennemsnitlige indtrængning af jordluft til husene estimeres til at være: 8,9 kBq/h divideret med 50 kBq/time = 0,2 m³/h. Indtrængningen varierer fra hus til hus. I korthed kan man sige, at hovedparten af husene havde jordluftindtrængningsrater mellem 0,04 og 0,7 m³/h.

En tilsvarende analyse kan gennemføres på grundlag af den landsdækkende undersøgelse af naturlig stråling i danske boliger /28/. Radonmålinger i 348 enfamiliehuse viser, at på årsbasis udgør jordluftindtrængning omkring 0,1 % af husenes samlede luftskifte. For hovedparten af husene forventes det, at tallet er mellem 0,02 og 0,3%. For to huse i undersøgelsen var den indendørs radonkoncentration over 480 Bq/m³. Dette svarer til mere end 4 % af husenes samlede lufttilførsel kommer fra jorden under husene.

5.1.4 Sammenfatning

For lossepladsgas er det primære problem at vurdere, om der et eller andet sted i huset i passende lang tid (indtil der sker gnistdannelse) kan samles en passende mængde jordluft med en metankoncentration over nedre eksplosiongrænse. Dette er et kompliceret problem. Med den nuværende viden er det kun muligt kvalitativt at redegøre for, hvordan visse bygningstekniske, geologiske og meteorologiske faktorer spiller ind.

De vigtigste drivkræfter er indendørs-udendørs trykforskelle på omkring 1 til 3 Pa samt fald i atmosfæretrykket. De vigtigste faktorer er jordens gaspermeabilitet og størrelsen af den umættede zone. Antallet af revner m.v. i betondækket formodes at spille en mindre rolle for indtrængningens samlede størrelse. Derimod formodes placeringen af revner og andre indtrængningssteder i gulvkonstruktionen at have stor betydning for om lossepladsgassen kan samles i en passende mængde (f.eks. i et rum eller hulrum med stillestående luft) eller om den hurtigt opblandes med rumluften.

Målinger af radon viser, at på årsbasis udgør jordluftindtrængningen for hovedparten af danske huse under 0,3 % af husenes samlede luftskifte. Hvis jordluften i Danmark udelukkende bestod af metan, skulle den årsmidlede metankoncentration i danske huse således være under 0,3 % (for så vidt at udeluften ikke indeholder metan). Dette illustrerer blot, at man altså ikke automatisk har et problem med lossepladsgas i huset blot, fordi der er

lossepladsgas i jorden udenfor. Der er således grundlag for en nøjere analyse af problemet.

I enkelte tilfælde er indtrængningen af jordluft væsentlig større end, hvad der gælder for det typiske danske hus. Der er for så vidt muligt at anslå andelen af sådanne huse statistisk. Derimod er det næppe muligt i en konkret risikolanalyse at give garanti for, at jordluftindtrængningen er lav (med mindre der foretages målinger). Eksempelvis kan tilsyneladende ens huse på tilsyneladende ens geologi nemlig have vidt forskellige radonniveauer. Mængden af jordgas, der trænger ind, varierer således fra hus til hus uden, at det normalt kan forklares bygningsteknisk eller geologisk.

For et givet hus kan den momentane jordluftindtrængning være betydeligt større end den årsmidlede værdi. Erfaringsmæssigt er indtrængningen normalt størst tidligt om morgenen (hvor den indendørs-udendørs trykforskel er størst). Modelberegninger viser, at indtrængningen desuden kan øges ved fald i det atmosfæriske tryk. Det kan bemærkes, at eksempelvis gasekspllosionerne ved Skellingssted /22/ og Loscoe, England /3/ skete tidligt om morgenen i forbindelse med fald i det atmosfæriske tryk.

5.1.5 Vurdering af bygningstyper

I det foregående kapitel er der ved beskrivelsen af gasindtrængningen til bygninger taget udgangspunkt i et "reference" hus, dvs. et et-plans hus med terrændæk, f.eks. et parcelhus opført i 1960'erne eller senere. Da langt fra alle bygninger på eller op til en losseplads passer på denne beskrivelse, vil der i dette afsnit blive forsøgt givet en generel beskrivelse af, hvilken betydning bygningskonstruktionen af forskellige bygningstyper har på de faktorer, der påvirker gasindtrængning og evt. gasopblanding i bygningerne. Der vil blive set på følgende bygningstyper:

- Bygninger med bræddegulve over jord (husmandssteder/landarbejderhuse/villaer fra før 1930'erne). Bygningerne vil typisk være opført før lossepladsen er anlagt, hvorfor bygningerne vil være beliggende op til lossepladsen.
- Villa fra mellemkrigsårene. Bygningerne er typisk opført med kælder eller krybekælder. Bygningerne vil typisk være opført før lossepladsen er anlagt, hvorfor bygningerne vil være beliggende op til lossepladsen.
- Boligblokke. Bygning opført i 2-4 plan, og typisk med hel eller halv kælder med opbevaringsrum og vaskerum for bygningens beboere. Bygningerne vil typisk være beliggende op til lossepladsen.
- Skoler og institutioner. Der findes flere eksempler på, at skoler eller institutioner er anlagt på gamle lossepladser.
- Industrihuse som f.eks. værksteder, butikcentre og lagerbygninger. Der findes mange eksempler på, at industriområder er anlagt helt eller delvist på gamle lossepladser.
- Lette opklodsede bygninger med fri luft under gulvet som f.eks. kolonihavehuse og pavilloner.

Beskrivelse i dette kapitel er af meget generel karakter, og bør kun anvendes ved en første screening af forholdene omkring lossepladsen. Før der foretages en egentlig risikovurdering for konkrete bygninger, bør der være foretaget en byggeteknisk gennemgang af en fagkyndig person.

Tæthed mod jord I de situationer, hvor der byggeteknisk er udført et ekstraordinært tæt gulv mod jord, vil risikoen for gasindtrængning være mindsket. Dette vil normalt kun forekomme i forbindelse med nyere byggeri, hvor bygningen er opført med:

- terrændæk/kældergulve efter Radon-vejledningen
- vandtætte kældergulve
- selvbærende gulve - og andre velstøbte armerede betondæk

Som nævnt i de foregående afsnit vil gasindtrængningen kunne ske, selv hvis der kun er meget små revner i gulvet. En effektiv sikring mod gasindsivning kan derfor oftest kun opnås ved mekanisk ventilation af et drænlag under bygningen /26/.

I bygningskonstruktioner med ekstraordinært utætte gulve vil muligheden for gasindtrængning øges. Dette vil normalt forekomme i forbindelse med ældre byggerier, eller f.eks. selvbygger huse. Bygninger med følgende karakteristika vil have ingen eller kun ringe sikring mod indtrængning af jordgasser:

- bræddegulve over jord (husmandssteder/landarbejderhuse/villaer fra før 1930'erne)
- sætningsskadede (revnede) betongulve.

For bygninger, der er opført på selve lossepladsen, vil der ofte kunne forekomme sætningsskader, desuden vil sætninger i fylden kunne bevirke, at der opstår utætheder ved lednings- og rørgennemføringerne i gulvet, ligesom sætningerne ligeledes kan give utætheder i kloaksystemet, med deraf følgende mulighed for indtrængning af gas via kloakken og utætte/udtørrede vandlåse. For bygninger, der er opført på selve lossepladsen, vil sætningerne i fylden bevirke, at der ofte forekommer et hulrum mellem undersiden af gulvkonstruktionen og fylden. Hulrummet vil bevirke, at der skabes hydraulisk kontakt mellem eventuelle revner i gulvet og et stort område af fylden samt, at der kan ske en ophobning af lossepladsgas direkte under gulvkonstruktionen.

Ventilation under bygning

Ventilation af et drænlag under bygningen vil effektivt kunne reducere indtrængningen af jordgasser til bygningen. Den samme effekt kan opnås for bygninger, der er opklodset, således at der er fri ventilation under gulvet, f.eks. pavilloner og kolonihavehuse. For bygninger med en godt ventileret krybekælder vil gasindtrængningen til bygningen kunne reduceres, idet der både vil ske en fortynding og bortventilering af de opsivende gasser. Både for bygninger med krybekælder og de for opklodsede bygninger vil den ene af de drivende kræfter "indendørs-udendørs trykforskellen" ikke have nogen væsentlig betydning, idet trykgradienten ikke vil kunne opbygges som en trykgradient mellem bygningen og jordens poreluft.

For at undgå kulde i gulvet er en del af de opklodsede bygninger forsynet med et skørt fra facaden til jord. Dette bevirker, at luftskiftet under bygningen reduceres, og der er mulighed for at der kan ske en ophobning af lossepladsgas i hulrummet mellem jordoverfladen og bygningens gulv. En sådan situation vil kunne øge risikoen for ulykker med lossepladsgas væsentligt. Også for bygninger med krybekælder vil der kunne opstå risiko for ophobning af lossepladsgas i kælderen, hvis ventilationen af krybekælderen er ringe. I perioder med f.eks. megen sne vil sneen helt eller delvist kunne blokere for ventilationen af hulrummet under bygninger.

Rumventilation

Et øget luftskifte (mekanisk ventilation) i bygningen vil kunne mindske risikoen for at eksplosionsfarlige gasblandinger opstår. I større bygninger vil der oftest være installeret mekanisk ventilation, som vedligeholdes og drives af personer, der har ansvar for at ventilationen virker, f.eks. ejendomsinspektører/ viceværter. I sådanne byggeri vil der derfor oftest være en god ventilation og dermed en mindsket risiko for gaseksplosions- ulykker. Bygningstyper, hvor der er mekanisk ventilation, er f.eks.:

- industrihuse (værksted/butikscentre/lager)
- boligblokke
- skoler/institutioner

I private boliger som enfamiliehuse og rækkehuse kan der ofte være et begrænset luftskifte, der vil medføre øget risiko for eksplosionsfarlige gaskoncentrationer. I mange bygninger med kælder er kælderen dårligt ventileret, specielt hvis kælderen ikke er beboet. Dårlige ventilationsforhold forekommer typisk i:

- mange enfamilie (har ofte luftskifte på 0,2 - 0,3 gang i timen mod BR-krav på 0,5)
- dårligt ventilerede kældre

5.2 Koncentration af lossepladsgas i bygninger

Som nævnt i afsnit 5.1.3.2 kan der regnes med gennemsnitlige indtrængningsrater for jordgasser i nyere enfamiliehuse på mellem 0,04 og 0,7 m³/h med en typisk værdi på 0,2 m³/h. Husene har en gennemsnitsstørrelse på ca. 100 m², hvilket giver indtrængningsrater på 0,0004-0,007 m³/h/m².

Koncentrationen af lossepladsgas i bygninger kan beregnes ved forskellige gasindtrængnings- og ventilationsrater. Hvis man antager, at lossepladsgassen fordeles sig homogent i bygningen, kan følgende simple formler anvendes:

$$(5.5) \quad C = \frac{q \cdot A}{V \cdot n} \cdot 100$$

hvor: C er koncentrationen i volumenprocent
q er gasindtrængningsraten i m³ pr. (m²·h)
A er bygningens areal (m²)
V er bygningens volumen (m³)
n er antal luftskifte pr. time.

Beregnete koncentrationer af lossepladsgas i bygninger for forskellige gasindtrængningsrater og luftskifter fremgår af tabel 5.1:

Naturligt luftskifte i en bygning vurderes på baggrund af /MST vejledninger 6 og 7, 1998/ til at være 0,3 pr. time.

De tre gasindtrængningsrater, som er anført øverst, svarer til de tidligere anførte rater for hhv. minimum, typisk og maksimal værdi. De tre nederste værdier svarer til en faktor 10 gange disse værdier:

Tabel 5.1 Beregnet koncentration (vol. %) af lossepladsgas i bygninger. I parentes er angivet koncentrationen af metan, idet det antages, at metankoncentrationen i lossepladsgassen udgør 50 vol. %

Luftskifte [/h]	0,3	1	2	5	
Gasindtrængningsrater [m ³ /(hm ²)]					
0,0004	0,06 (0,03)	0,02 (0,01)	0,01 (0,004)	0,004 (0,002)	Minimum værdi
0,002	0,3 (0,15)	0,09 (0,04)	0,04 (0,002)	0,02 (0,01)	Typisk værdi
0,007	1 (0,5)	0,3 (0,16)	0,15 (0,08)	0,06 (0,03)	Maksimum værdi
0,004	0,6 (0,3)	0,2 (0,1)	0,09 (0,04)	0,04 (0,02)	10 gange de estimerede værdier
0,02	3 (1,5)	0,9 (0,4)	0,44 (0,22)	0,18 (0,09)	
0,07	10 (5)	3 (1,5)	1,5 (0,8)	0,6 (0,3)	

I bygninger med et naturligt luftskifte (0,3 gange pr. time) skal gasindtrængningsraten være større end 0,03 m³/h m² for, at der kan forekomme koncentrationer af lossepladsgas over 5 vol. %, når der sker en homogen opblanding i rummet. Hvis metankoncentrationen i lossepladsgassen er på 50 vol.%, skal gasindtrængningsraten være større end 0,07 m³/h m² for, at der kan forekomme koncentrationer over nedre eksplosionsgrænse i rummet. Når det forudsættes, at der sker en homogen opblanding i rummet, vil der i bygninger med mekanisk luftskifte ikke forekomme koncentrationer over nedre eksplosionsgrænse (5 vol.%), selv ved meget høje gasindtrængningsrater på 0,7 m²/(hm²)

Ved naturligt luftskifte i bygningen kan man godt forestille sig, at der kan optræde stratificering af lossepladsgasser i bygningen eller egentlig ophobning af gasser i rum eller f.eks. skabe med stillestående luft.

For at få et indtryk af, hvor meget gas der kan brænde i en bygning, er der foretaget en simpel omregning af koncentrationerne i tabel 5.2 til volumenandel af bygningen, som kan fyldes til nedre eksplosionsgrænse ved de anførte gasindtrængningsrater og luftskifter. Omregningen er foretaget efter følgende formel:

$$(5.6) \quad \frac{V_{LEL}}{V} \cdot 100 = \frac{C \cdot 100}{LEL}$$

Hvor V_{LEL} er volumenet af en gas/luftblanding med gaskoncentrationen LEL, som er den nedre eksplosionsgrænse.

C er den resulterende koncentration ved totalopblanding i hele rummet som er beregnet i tabel 5.1.

De beregnede volumenandele er fremhævet for et naturligt luftskifte på 0,3 gange i timen:

Tabel 5.2 Volumenandel (i %) af bygningen, som kan fyldes til nedre eksplosionsgrænse

Luftskifte [/h]	0,3	1	2	5	
Gasindtrængningsrater [$\text{m}^3/(\text{hm}^2)$]					
0,0004	0,6 %	0,2 %	0,09 %	0,04 %	Minimum
0,002	3 %	0,9 %	0,4 %	0,2 %	Typisk
0,007	10 %	3,1 %	1,5 %	0,6 %	Maksimum
0,004	6 %	2 %	0,9 %	0,4 %	10 gange estimerede værdier
0,02	29 %	9 %	4,4 %	1,8 %	
0,07	103 % *	31 %	15 %	6 %	

* Gasindtrængningen vil give en gennemsnitskoncentration i hele rummet over nedre eksplosionsgrænse.

CFD-beregninger (Computational Fluid Dynamics), som kan modellere strømninger i og omkring komplicerede strukturer, kan evt. anvendes til at afklare, om der mulighed for stratificering af lossepladsgasser i et rum i en specifik bygning, således at mindre indtrængningsrater vil kunne give anledning til lokale koncentrationer over nedre eksplosionsgrænse.

Tabel 5.2 viser, at der ved naturligt luftskifte (0,3 gange i timen), gasindtrængningsrater på mindst $0,007 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ og stratificering i bygningen kan forekomme en koncentration på 5 vol-% (LEL) i mindst 10 % af bygningen. Dette svarer til den koncentration, som vil kunne give anledning til forbrændingsskader/dødsfald pga. temperaturstigning i rummet, se afsnit 2.3. Med mekanisk ventilation skal gasindtrængningen være mere end 3 gange så stor.

6 Referencer

- /1/ Landfilling of Waste: Biogas. Edited by T. H. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann. First edition 1996. ISBN 0 419 19400 2
- /2/ N. J. O'Riordan og C. J. Milloy. Risk assessment for methane and other gases from the ground. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Report no. 152, 1995.
- /3/ P. J. Hooker and M. P. Bannon. Methane: Its Occurrence and Hazards in Construction. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Report no. 130, 1995.
- /4/ K. Haarstad. Methane in Landfills: Production, Oxidation and Emissions. Sixth International Landfill Symposium, Sardinia 1997, Proceedings, volume VI, p. 33-44.
- /5/ Miljøstyrelsens vejledninger nr. 6 og 7, 1998. Oprydning på forurenede lokaliteter
- /6/ Forprojektet. Risikovurdering ved gaslossepladser. Miljøstyrelsen, August 1998.
- /7/ M. Christophersen and P. Kjeldsen. Field Investigations of Lateral Gas Migration and Subsequent Emission at an Old Landfill. Seventh International Landfill Symposium, Sardinia 1999, Proceedings, volume VI, p. 79-87.
- /8/ C. Maurice og A. Lagerkvist. Seasonal Variation of Landfill Gas Emissions. Sixth International Landfill Symposium, Sardinia 1997, Proceedings, volume VI, p. 87-93.
- /9/ J. Harbst. Dansk Brandteknisk Institut. Personlig kommunikation med Lene Schepper 1991.07.17.
- /10/ Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationer i danske enfamiliehuse. Claus E. Andersen m.fl. , Forskningscenter Risø, April 1997. Rapport nr. Risø-R-979(DA).
- /11/ Christophersen M. Lateral spredning og emission af gas fra en gammel losseplads. PhD afhandling. Institutet for Miljøteknologi. 28 april 2000
- /12/ Andersen, C.E.: Entry of soil gas and radon into houses. Risø rapport: Risø-R-623(En). 86 sider, 1992.
- /13/ Nazaroff WW. Radon transport from soil to air. Review of Geophysics 1992;30(2);137-160.

- /14/ Andersen, C.E., Koopmans, M. og de Meijer, R.J.: Identification of advective entry of soil-gas radon into a crawl-space covered with sheets of polyethylene foil. Risø rapport: Risø-R-876(En), 126 sider, 1996.
- /15/ Little, JC, Daisey JM and Nazaroff WW: Transport of subsurface contaminants into buildings - An exposure pathway for volatile organics. Environ. Sci. Technol., 1992, vol. 26(11), 2058-2066.
- /16/ Robinson AL, Sextro RG. The influence of a subslab gravel layer and open area on soil-gas and radon entry into two experimental basements. Health Physics 1995;69(3);367-377.
- /17/ Clements, WE and Wilkening MH: Atmospheric pressure effects on ²²²Rn transport across the earth-air interface. Journal of Geophysical Research, 1974, vol. 79(33); 5025-5029.
- /18/ Robinson AL, Sextro RG, Riley WJ. Soil-gas entry into houses driven by atmospheric pressure fluctuations - The influence of soil properties. Atmospheric Environment 1997;31(10);1487--1495.
- /19/ Revzan KL, Fisk WJ, Gadgil AJ. Modelling radon entry into houses with basements: Model description and verification, Indoor Air 1991;2;173--189.
- /20/ Riley WJ, Gadgil AJ, Bonnefous YC, Nazaroff WW. The effect of steady winds on radon-222 entry from soil into houses. Atmospheric Environment 1996;30(7);1167--1176.
- /21/ Riley WJ, Robinson AL, Gadgil AJ, Nazaroff WW. Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results. Atmospheric Environment, 1999, vol. 33, 2157-2168.
- /22/ Kjeldsen P and Fichser EV: Landfill gas migration-Field investigations at Skellingsted landfill, Denmark. Waste Management & Research, 1995, vol. 13, 467-484.
- /23/ Andersen, C.E., Søgaard-Hansen, J., og Majborn B.: Soil-gas entry into a simple test structure: Comparison of experimental and modelling results. Radiation Protection Dosimetry vol. 56(1-4), 151-155 (1994).
- /24/ Robinson AL, Sextro RG, Fisk WJ: Soil-gas entry into an experimental basement driven by atmospheric pressure fluctuations- Measurements, spectral analysis, and model comparison. Atmospheric Environment, 1997, vol. 31(10), 1477-1585.
- /25/ Adomait M: Soil gas containing VOCs entering homes near hazardous lands. CMHC, Canada Mortgage and Housing Corporation, 1992.

- /26/ Andersen, C.E., Bergsøe, N.C., Brendstrup, J., Damkjær, A., Gravesen, P., Ulbak, K.: Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Risø rapport: Risø-R-979(DA), 108 sider, april 1997.
- /27/ Andersen, C.E., Bergsøe, N.C., Majborn, B., and Ulbak, K.: Radon and natural ventilation in newer Danish single-family houses. Indoor Air, vol. 7, 278-286, 1997.
- /28/ Statens Institut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø: Naturlig Stråling i danske boliger. Sundhedsstyrelsen, 1987.
- /29/ Andersen, I. Basisbog i arbejdsmedicin. Del II, risikofaktorer i arbejdsmiljøet. Arbejdstilsynet november 1983.
- /30/ Københavns Amt.. Effektvurdering af pilotanlæg på Lyngby Losseplads. COWI 1998.

1 Indledning

Siden starten af 1990'erne er der i Danmark udført undersøgelser for lossepladsgas på en lang række af de tidligere, nu nedlagte lossepladser. Undersøgelserne har været målrettet mod at belyse gasproduktionen i lossepladserne og risikoen for gasindtrængning i bygninger på eller op til lossepladserne. For de idriftværende affaldsdeponier udføres der også gasundersøgelser. Disse er dog i højere grad rettet mod at vurdere gasproduktionen i lossepladserne med henblik på indvinding og evt. udnyttelse af lossepladsgassen, og det er kun i forbindelse med et fåtal af affaldsdeponierne, der føres kontrol med gasmigrationen.

I forbindelse med udarbejdelsen af denne arbejdsrapport er der rettet forespørgsel til de danske amter (jf. bilag 5 afsnit 1) med henblik på at indhente oplysninger om bl.a. status og erfaringer med gasundersøgelser. Arbejdsgruppen har desuden oplysninger om omfanget af tidligere udførte gasundersøgelser fra henholdsvis Københavns Amt og Vestsjællands Amt, hvor COWI har gennemgået sager for mere end 25 lossepladser med henblik på at revurdere gasrisikoen og eventuel monitoringsstrategi.

De indhentede oplysninger viser, at de udførte undersøgelser har meget varierende omfang og kvalitet, ligesom de undersøgelsesstrategier, der har været anvendt, ofte også har været meget forskellige. Således er der i nogle tilfælde lagt meget vægt på at foretage målinger inde i bygningerne, medens der i andre tilfælde slet ikke er indhentet oplysninger til belysning af de bygningsmæssige forhold.

I Miljøstyrelsens vejledninger nr. 6 og 7 fra 1998 /1/ er angivet retningslinier for udførelse af gasundersøgelser, som, hvis de følges, vil kunne give et godt grundlag for risikovurderingen af risiciene for gasindtrængning i bygninger på eller op til en gasproducerende losseplads.

Formålet med dette bilag er dels at give en detaljeret beskrivelse af hvilke undersøgelser, der er nødvendige for at kunne foretage en risikovurdering som beskrevet i hovedrapportens kapitel 3, dels at danne grundlag for valg af undersøgelsesstrategi.

En gasundersøgelse, der skal lede frem til en risikovurdering, kan opdeles i 3 faser:

- Orienteringsfasen:
 - Dataindsamling omkring deponeringsforhold, geologi og arealanvendelse af lossepladsen og dens nærmeste omgivelser.
- Indledende feltundersøgelser
 - Undersøgelser af det gasproducerende område.
 - Eventuelle undersøgelser ved bygninger som ligger tæt op til det gasproducerende område.

- Supplerende feltundersøgelser
 - Uddybende undersøgelser af gasproduktionen.
 - Undersøgelser af gasspredningen, herunder gasfanens udbredelse, og undersøgelser af gaspermeabilitet.
 - Dataindsamling omkring byggetekniske forhold.
 - Byggeteknisk gennemgang og indendørsmålinger.

2 Orienteringsfasen

Første led i en gasundersøgelse er dataindsamlingen, hvor der tilvejebringes oplysninger om de parametre, der har betydning for gasproduktionen og gastransporten ud af lossepladsen. I modsætning til traditionelle forureningsundersøgelser så vil feltdelen af en gasundersøgelse kunne foretages udelukkende ved hjælp af bærbare feltinstrumenter, hvilket har den fordel, at omkostningerne til målingerne er meget beskedne, og resultatet foreligger i det øjeblik, målingen er foretaget. Ved en gasundersøgelse er det derfor økonomisk overkommeligt og hurtigt at skabe et stort datamateriale om gaskoncentrationerne i lossepladsen. Dette har foranlediget, at der ved mange undersøgelser ikke er lagt særlig stor vægt på de historiske oplysninger, hvilket i mange undersøgelser har vist sig at være en stor mangel. Ved en gasundersøgelse foretages der målinger af nedbrydnings-/affaldsprodukterne fra mikrobiologiske processer, og koncentrationerne af lossepladsgas kan derfor variere meget både geografisk og over tid. Specielt i udkanten af lossepladsen eller i ældre lossepladser vil gaskoncentrationen kunne variere fra meget lave koncentrationer til meget høje koncentrationer over få timer/dage /7/. En vurdering af gasproduktionen foretaget udelukkende på baggrund af feltmålingerne, vil derfor ofte kunne give anledning til fejltolkninger. Udover at være et vigtigt led i planlægningen og udførelsen af gasundersøgelserne er de historiske oplysninger om lossepladsens opbygning og de geologiske og hydrogeologiske forhold et essentielt led for forståelsen af lossepladsen og dermed i tolkningen af resultaterne af gasmålingerne.

Formål

Formålet med en orienterende fase er således at danne grundlag for en 3-dimensionel "model" af lossepladsen og dens omgivelser. Med ordet model menes ikke model i matematisk forstand, men snare en hypotese/forståelse af hvordan lossepladsen er opbygget og af de geologiske og hydrogeologiske forhold omkring lossepladsen. Den orienterende fase har ligeledes til formål at skabe grundlag for en første vurdering af, om der kan være en gasrisiko ved lossepladsen, eller om de fysiske forhold omkring lossepladsen, f.eks. fyldens beskaffenhed eller afstanden til nærmeste bygning, er således, at der ikke er en gasrisiko.

Dataindsamling

De oplysninger, der kan indhentes, vil variere meget fra losseplads til losseplads, for nogle pladser vil det være muligt at indhente meget detaljerede oplysninger om lossepladsen, medens det for andre umiddelbart kun vil være muligt at få meget få oplysninger. Som nævnt er de historiske oplysninger om lossepladsen oftest essentielle for tolkningen af undersøgelsesresultaterne, og kvaliteten af en undersøgelse bliver derfor væsentligt bedre, hvis der lægges tilstrækkelige ressourcer i at få et ordentligt datamateriale.

Dataindsamlingen bør som minimum omfatte følgende forhold:

- Deponerede affaldstyper
- Deponerede affaldsmængder/fyldtykkelser
- Deponeringsperioder
- Lokal geologi og hydrogeologi
- Lossepladsens afdækning

I det omfang det er muligt, bør lossepladsens såvel tidsmæssige som geografiske udvikling belyses.

Amternes Videntcenter for jordforurening har i 1998 udgivet en rapport om grundvandsundersøgelser ved fyld- og lossepladser /2/. I den ovenfor nævnte rapport's kapitel 3 er givet en grundig beskrivelse af de forskellige informationskilder, der kan anvendes ved indhentning af oplysninger. Desuden gives en beskrivelse af, hvorledes disse data tolkes og sammenstilles. Da tolkningen af forhold, der har betydning for perkolatdannelse og spredning, ofte er de samme som de forhold, der har betydning for lossepladsgassens dannelse og spredning, vil denne del af kapitlet også med fordel kunne læses.

Ved dataindsamlingen er der to kilder til detaljerede informationer om lossepladsen, der ofte bliver overset, og som ikke er medtaget i /2/.

- Geotekniske undersøgelser. Specielt for lossepladser, som ligger i bymæssig bebyggelse, vil der ofte være udført geotekniske undersøgelser i og omkring lossepladsen. Disse vil kunne give oplysninger om fyldhøjder og fyldtyper, lossepladsens udstrækning og de geologiske forhold umiddelbart under og omkring fylden.
- Andre miljøtekniske undersøgelser. I mange amter er/har gasundersøgelserne været adskilte fra de øvrige undersøgelser. I amtets miljørager kan der derfor allerede ligge detaljerede oplysninger om lossepladsen og dens omgivelser, f.eks. i form af boreprofiler, geologiske snit m.v.

En gennemgang af amtets miljørager og kommunens byggesag kan derfor oftest anbefales.

Ledningsoplysninger Dataindsamlingen skal også omfatte oplysninger om anlægs- og ledningsarbejder på og umiddelbart omkring lossepladsen, da de kan være af stor betydning for spredningen af gassen. Der bør indhentes oplysninger om placeringen af både nye og gamle ledninger og ledningstracéer. Disse oplysninger sammenholdes med oplysninger om placeringen af bygninger og eventuelle tekniske anlæg (bygværker). Ved vurderingen af ledningsarbejderne vil det typisk være de større ledningstyper som f.eks. fjernvarme, kloak og højspændingsledninger, hvor gastransport i sandfyldet omkring ledningen vil kunne bevirke, at væsentlige mængder af gas kan transporteres over større afstande. Stikledninger ind til bygninger vil kunne bevirke at gassen transporteres langs ledningen frem til bygningen. Specielt for bygninger, der ligger på eller umiddelbart op til lossepladsen, vil stikledningerne have betydning for gasmigrationen frem til bygningen.

Besigtigelse Som led i orienteringsfasen er det oftest formålstjenligt at foretage en eller flere besigtigelser af lossepladsen og de omkringliggende områder. Besigtigelse af lossepladsen vil oftest kunne uddybe forståelsen for lossepladsens opbygning og give en rumlig fornemmelse for lossepladsens størrelse og udformning samt af de topografiske forhold omkring lossepladsen. Besigtigelsen vil ligeledes give faktuelle oplysninger om f.eks. den nuværende arealanvendelse af området, eller om der er tegn på vegetationsskader på området.

Besigtigelser af området vil desuden give oplysninger om adgangsforhold m.v. til brug for planlægningen af feltundersøgelserne.

Første risikovurdering På baggrund af de indsamlede data foretages en første overordnet vurdering af gasrisikoen. Risikovurderingen foretages med henblik på at vurdere, om det er nødvendigt at foretage egentlige gasundersøgelser. Gasundersøgelser kan undværes, såfremt der er oplysninger om, at der ikke er deponeret bionedbrydeligt affald i lossepladsen, eller såfremt afstanden til de nærmeste bygninger er så stor, at det vurderes, at eventuelt udsivende gas ikke kan nå frem til bygningen. En vurdering af om afstanden til nærmeste bygning er så stor, at udsivende gas ikke når frem til bygningen, kan foretages ud fra ligning 3.4 i hovedrapporten. Hvis afstanden mellem lossepladsen og bygningen (L) er større end 2 gange $L_{\max}$, vurderes bygningen at ligge i så stor afstand fra lossepladsen, at der ikke er en gasrisiko. Der kan ligeledes være naturlige eller menneskeskabte forhold, der hindrer gassen i at kunne nå frem til bygningen, f.eks. åer eller grøfter, der løber mellem lossepladsen og bygningen. Grøfterne skal dog være så dybe, at de dækker hele eller det meste af den umættede zone.

3 Indledende undersøgelser

3.1 Undersøgellesprogram

Formål

Formålet med den indledende undersøgelse er at danne grundlag for en egentlig vurdering af gasrisikoen. Undersøgelsen skal være et supplement til orienteringsfasen, hvor de data, der er indsamlet, suppleres og uddybes.

Den indledende undersøgelse skal som minimum belyse følgende forhold:

- Lossepladsens gasproduktion, dvs. den rumlige afgrænsning af det gasproducerende område og en første vurdering af gasproduktionens størrelse. Undersøgelsen skal således kunne danne grundlag for vurdering af den første udgangshændelse i risikovurderingen "Lossepladsen producerer gas i skadelige koncentrationer/mængder".
- De overordnede geologiske, hydrogeologiske og topografiske forhold med henblik på en vurdering af gasspredningen fra lossepladsen og de forhold, der evt. kan begrænse gasspredningen.
- Beliggenhed og anvendelsen af bygninger på lossepladsen og i lossepladsens nærområde.

Den indledende gasundersøgelse kan desuden omfatte målinger af gasmigrationen uden for lossepladsen, hvis det allerede på baggrund af orienteringsfasen står klart, at der vil være en betydelig gasmigration fra lossepladsen. Undersøgelser af gasmigrationen vil dog normalt foretages i forbindelse med en supplerende undersøgelse.

Strategi

Undersøgelsens omfang og strategi vil afhænge af hvilket datagrundlag, der er tilvejebragt i den orienterende fase. Den overordnede strategi ligger dog fast, og undersøgelsen kan opdeles i to dele, først en indledende screening, hvor hele lossepladsens areal bliver dækket med målinger i de øvre fyldlag, og herefter undersøgelse af gasvariationen over dybden i udvalgte punkter. Undersøgelsen skal have et sådant omfang og en sådan kvalitet, at den giver en uddybende og bedre forståelse for den lossepladsmodel, der blev opstillet i den orienterende fase. Undersøgelsen skal således kunne anvendes til at bekræfte eller afkræfte de hypoteser, der er opstillet i modellen om f.eks. fyldtyper og fyldhøjder, eller til at supplere de oplysninger, der tidligere er indhentet.

Gasudbredelse

Første led i den indledende undersøgelse er at foretage en horisontal afgrænsning og beskrivelse af det gasproducerende område. Dette gøres ved at udlægge et net af målepunkter, der dækker hele lossepladsens område samt eventuelt lossepladsens nærområde, dvs. 10-50 m fra lossepladsens kant. Tætheden af målepunkterne bør afhænge af lossepladsens karakter, samt arealanvendelsen som foreslået i tabel 3.1. Hvorvidt målepunkterne udføres som filtersatte boringer eller jordspyd bør afhænge af, hvor præcis en viden der er om lossepladsens opbygning og fyldtyper og om den omkringliggende geologi. I kap 3.2 i dette bilag er givet en beskrivelse af opbygningen af forskellige typer målepunkter samt fordele og ulemper ved de forskellige metoder.

På baggrund af kortlægningen af lossepladsgassens horisontale udbredelse foretages en undersøgelse af den vertikale gasudbredelse. Specielt i ældre lossepladser kan der være meget stor variation i produktionen og dermed gaskoncentrationen over dybden. Oftest vil den største gasproduktion foregå i bunden af fylden, hvor fugtigheden er størst, og hvor der konstant hersker anaerobe forhold. Der bør derfor etableres en række målepunkter, hvor gaskoncentrationen kan måles i de dybereliggende fyldlag. Antallet og placeringen af målepunkterne skal vurderes på baggrund lossepladsens horisontale udbredelse og oplysningerne fra den orienterende fase, samt arealanvendelsen af lossepladsen.

For de lossepladser, hvor det allerede tidligt i undersøgelsesforløbet kan vurderes, at der er stor gasrisiko for bygninger uden for lossepladsen, bør den indledende undersøgelse også omfatte målinger af gaskoncentrationen i området mellem bygningen og lossepladsen. Målepunkterne skal etableres, så gaskoncentrationen kan måles i hele den umættede zones højde eller som minimum til en dybde svarende til bunden af lossepladsen. For lossepladser hvor der er viden om, at der er en kraftig gasproduktion, f.eks. i idriftværende affaldsdeponier, vil variationerne i gaskoncentrationerne inden for den enkelte affaldscelle variere meget lidt. Ved den indledende undersøgelse skal der derfor lægges vægt på at undersøge gasmigrationen.

Antal målinger

Specielt på ældre lossepladser, hvor der er en ringe gasproduktion, vil årstidsvariationer, meteorologiske forhold m.v. have en påvirkning på måleresultaterne. Der bør derfor som minimum udføres målinger 3 gange i hvert eneste målepunkt. Målerunderne bør fordeles, så både årstidsvariationer og forskellige vejsituationer bliver dækket af undersøgelsen. For idriftværende lossepladser vil gasproduktionen være så kraftig, at der kun sjældent vil kunne ses variationer i gasproduktionen på grund af ændringer i de atmosfæriske forhold eller årstidsvariationer.

I målepunkter, der er placeret uden for det gasproducerende område, vil variationerne i gaskoncentrationerne ofte være sammenfaldende med variationerne i atmosfæretrykket således, at når trykket i atmosfæren falder, så stiger indholdet af lossepladsgas i borerne. Det er derfor vigtigt, at mindst én målerunde foretages i forbindelse med et fald i atmosfæretrykket. For at sikre dette kan det anbefales, at der foretages kontinuerte målinger i borer uden for lossepladsen. Mange af de gasmålere, der anvendes i Danmark, har indbygget datalogger, og kan ved en simpel ombygning anvendes til kontinuerte målinger, hvor der f.eks. foretages målinger en gang i timen i 14 dage.

Tabel 3.1 Forslag til overordnet strategi for undersøgelse af den horisontale udbredelse af lossepladsgas

Lossepladstype	Afstand mellem målepunkter	Begrundelser
Lossepladser med kraftig gasproduktion f.eks. idriftværende affaldsdeponier	Ca. 100-200 m inden for lossepladsen, dog minimum 3 pr. affaldscelle.	Der er kun lille geografisk variation i gaskoncentrationer og gasproduktionen inden for selve lossepladsens celler. Et fyldestgørende billede kan derfor opnås med forholdsvis få målepunkter.
<i>Bygninger på lossepladsen</i>	Ca. 10-30 m ved bygninger	Hvis der er bygninger på selve lossepladsen (mandskabsbygninger, maskinbygninger, m.v.) øges antallet af målepunkter.
<i>Bygninger op til lossepladsen</i>	25-100 m udenfor lossepladsen	Der kan være stor risiko for horisontal gasmigration ud af lossepladsen. Der bør derfor lægges vægt på at undersøge for gasmigration. Hvis der er nærliggende bygninger, øges antallet af målepunkter i området mellem lossepladsen og bygningerne.
Lossepladser med lav eller moderat gasproduktion, og <u>ingen</u> bygninger på selve lossepladsen	25-100 m inden for lossepladsen	Der kan være stor geografisk og tidsmæssig variation i gaskoncentrationerne. En præcis afgrænsning af det gasproducerende område er dog ikke kritisk, hvorfor et fyldestgørende billede derfor kan opnås med forholdsvis få målepunkter.
<i>Bygninger op til lossepladsen</i>	(5-50 m udenfor lossepladsen)	Der er risiko for en mindre horisontal gasmigration ud af lossepladsen. Undersøgelserne kan derfor evt. omfatte nærområdet omkring lossepladsen. Hvis der er nærliggende bygninger, øges antallet af målepunkter i området mellem lossepladsen og bygningerne.
Lossepladser med lav eller moderat gasproduktion, og bygninger på selve lossepladsen	Ca. 25 m inden for lossepladsen	Der kan være stor geografisk og tidsmæssig variation i gaskoncentrationerne. En præcis afgrænsning af det gasproducerende område er kritisk, hvorfor et fyldestgørende billede kan opnås med en forholdsvis tæt net af målepunkter.
<i>Bygninger på lossepladsen</i>	5-10 m ved bygninger	Omkring bygninger øges antallet af målepunkter.
<i>Bygninger op til lossepladsen</i>	(5-50 m udenfor lossepladsen)	Der er risiko for en mindre horisontal gasmigration ud af lossepladsen. Undersøgelserne kan derfor evt. omfatte nærområdet omkring lossepladsen. Hvis der er nærliggende bygninger, øges antallet af målepunkter i området mellem lossepladsen og bygningerne.

3.2 Prøvetagning

I dette afsnit gives en kort beskrivelse af de forskellige målesteder og målemetoder, der typisk anvendes i forbindelse med gasundersøgelser i Danmark. I Miljøstyrelsens oversættelse af den engelske Waste Management Paper No 27, /3/ og i /4/ er der ligeledes givet detaljerede beskrivelser af forskellige målesteder og målemetoder. For uddybende information henvises derfor til disse.

Opbygningen af målepunktet kan foretages efter 2 forskellige principper /5/:

- Sonder. Betegnelse for rør med løs spids, slidser eller filter, der nedrammes i jorden, enten med eller uden forboring. Sonder omfatter f.eks.
 - Jordspyd og slagsonder
 - GeoProbe og CPT
- Gasboringer. Betegnelse for boringer der etableres med filter i den umættede zone. Boringerne etableres oftest ved hjælp af traditionelle snegleboringer, hvor filteret installeres med traditionel gruskastning og afpropning. Boringerne kan opdeles i to typer:
 - Traditionel gasboring (traditionelle filtersatte boringer med filter og blindrør i samme dimension)
 - Poreluftfiltre (specielle korte filtre med lille volumen, der forbindes til overfladen via en slange).

Foruden målinger af poreluften kan der foretages indendørsmålinger og målinger i tekniske installationer som kloakker, brønde m.v. Målinger i disse beskrives sidst i afsnittet.

3.2.1 Sonder

3.2.1.1 Jordspyd

Gasmålinger ved hjælp af jordspyd foretages ved at nedramme (banke/presse) jordspydet ned i en bestemt dybde, hvor poreluften skal udtages. Målingerne kan enten udføres med midlertidige spyd, hvor jordspydet trækkes op efter målingen er foretaget, eller med permanente spyd, hvor jordspydet afpropes og efterlades efter endt måling.

Fordele

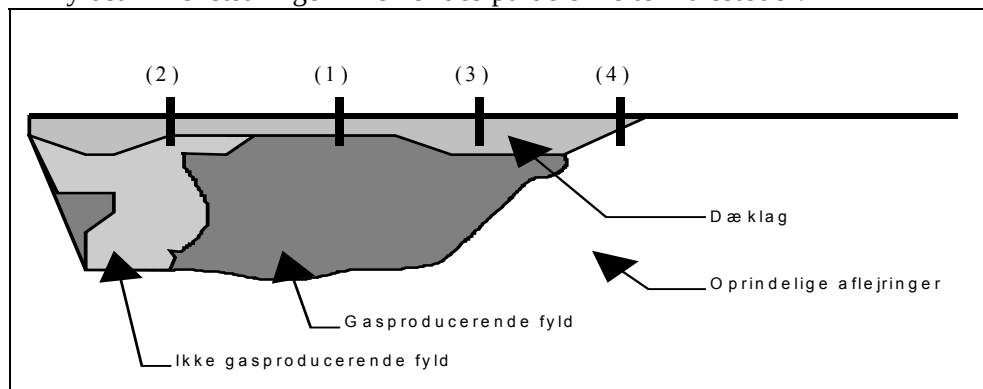
Fordelene ved at bruge jordspyd er, at det er en metode, som er relativ hurtig (billig), og udstyret, der skal bruges til nedramningen af jordspydene, er forholdsvis let og mobilt. Jordspyd kan derfor bruges på steder, hvor der er meget lidt plads, og hvor der let kan forekomme skader i forbindelse med borearbejdet, f.eks. i parcelhushaver.

Ulemper

Der er til gengæld en række ulemper ved metoden:

- Jordspyd har ofte en forholdsvis lille/kort åbning, hvorigennem poreluften skal suges. Jordspydet har derfor kun direkte kontakt med et forholdsvis lille jordvolumen. Specielt i fyld / jord med en ringe porøsitet kan dette bevirke, at det kan være svært at udtage en tilstrækkelig luftmængde til målingen. Ved brug af bærbare gasmålere vil dette bevirke, at luftskiftet i målecellen vil være for lille til, at alt den gamle luft i cellen vil blive udskiftet med frisk poreluft, hvorved der kan opstå fejlmålinger.
- Hvis jordspydet bankes ned i jorden, kan rystelserne ved nedramningen bevirke, at der opstår utætheder mellem jorden og jordspydet. Ved prøvetagningen kan man derfor risikere, at der trækkes atmosfærisk luft ned langs jordspydet via disse utætheder, og at poreluften derfor kan blandes med atmosfærisk luft, med deraf følgende fejlmålinger.
- Ved nedramningen af jordspydene vil man ikke få oplysninger om, hvilke jord-/fyldlag jordspydet går gennem. Dette vanskeliggør tolkningen af måleresultaterne, især hvis der er målt lave gaskoncentrationer. I figur 3.1 er der vist et eksempel på placeringer af fire gasmålesteder/jordspyd. Jordspyd (1) er placeret optimalt i forhold til en vurdering af, om lossepladsen

er gasproducerende. Jordspydene (2), (3) og (4) er placeret i ikke-gasproducerende fyld-/jordlag, og der vil formodentligt kun kunne spores ringe eller ingen koncentrationer af lossepladsgas i disse jordspyd. Ved en vurdering af resultaterne af de udførte gasmålinger vil det være svært at vurdere, hvorvidt der er tale om situation (2), (3) eller (4), da fyldlag og fyldsammensætninger ikke kendes på de enkelte målesteder.



Figur 3.1 Placering af gasmålesteder/målesonder i losseplads

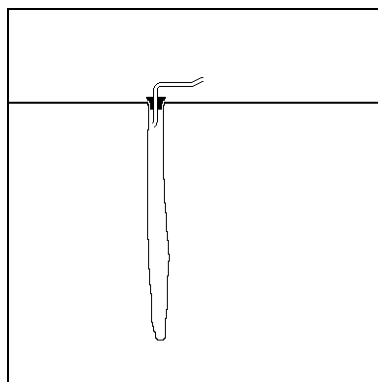
Specielt i ikke-gasproducerende områder kan koncentrationen af lossepladsgas i poreluften ændres kraftigt, bl.a. som følge af trykændringerne i atmosfæren. Gasundersøgelser bør derfor omfatte flere målerunder, hvor der foretages målinger i alle målesonder. Hvis jordspydene ikke etableres som permanente målesonder, vil dette ikke være muligt, hvorved en væsentlig fortolkningsmulighed af måleresultaterne mindskes.

Sammenfatning

Jordspyd er en billig og hurtig metode til etablering af gasmålesonder, der bl.a. kan anvendes på steder, hvor der er meget lidt plads, eller hvor der let kan forekomme skader i forbindelse med borearbejde. Da metoden ikke giver oplysninger om geologi/fyldsammensætninger, bør metoden kun anvendes i områder, hvor "geologien" er kendt f.eks. fra geotekniske undersøgelser eller andre forureningsundersøgelser. Metoden bør endvidere kun anvendes ved en indledende screening af lossepladsen, og den bør altid suppleres med egentlige filtersatte gasboringer, før der foretages vurderinger af, om afværgeforanstaltninger er fornødne eller ej.

3.2.1.2 Slagsonde

En prøvetagningsmetode, der ligner jordspydet, er anvendelse af slagsonde. En slagsonde er en massiv jernstang, der bankes ca. 1 - 1,5 m ned i jorden. Når jernstangen trækkes op, bliver der et hul i jorden. Hullet lukkes med en prop. I proppen er der et hul, hvorigennem gassen kan suges op i gasdetektoren. se figur 3.2.



Figur 3.2 Hul fra slagsonde

Fordelen ved at anvende slagsonden er, at der kan etableres et målepunkt hurtigere end tilfældet er ved etablering af jordspyd.

I forhold til jordspydet får man ved brug af slagsonden kontakt med et større porevolumen, idet der kan trækkes luft langs hele slagsondens dybde. Ved brug af slagsonden er der derfor sjældent problemer med at udtage en tilstrækkelig luftmængde til analyse, selv i jord med en ringe porøsitet. Ulempen er, at det ikke vides, hvorfra poreluften kommer: Man får således ikke oplysninger om der er en ligelig indstrømning af poreluft langs hele slagsondens dybde, eller om poreluften hovedsageligt kommer fra toppen eller bunden af hullet. Resultater fra slagsondemålinger kan derfor være sværere at vurdere end jordspydsmålinger. Endnu en ulempe ved slagsonden er, at der er tale om engangsmålinger. Hvis man vil foretage flere målerunder er det nødvendigt at etablere nye huller med slagsonden ved hver målerunde, idet hullerne vil skride sammen mellem målerunderne.

Som for de almindelige jordspyd fås der ingen oplysninger om fyldsammensætning/geologi ved nedramningen af slagsonden. Slagsonden bør derfor i lighed med jordspydet kun anvendes i forbindelse med indledende screening af lossepladsen, f.eks. til brug ved bestemmelse af den optimale placering af egentlige gasboringer.

3.2.1.3 Sonderinger

Sonderinger med CPT-bil er en metode, hvor en sonde langsomt presses ned i jorden. For hver halve meter udtages en luftprøve, som måles for lossepladsgas, gasflow og modtryk. Metoden har de samme mangler som jordspydene, men i modsætning til jordspydene har metoden den fordel, at der for hver sondering fås oplysninger om den vertikale variation i gaskoncentrationerne og gasflow. Sonderinger er dog engangsmålinger, idet sonden trækkes op, når målingerne er udført. Ved sonderingerne fås der derfor ingen oplysninger om variationen i gaskoncentrationerne over tiden.

En ulempe ved metoden er, at den bil, der skal udføre målingerne, ikke er særlig terrængående, hvorfor målingerne hovedsageligt kun kan laves langs veje og stier.

3.2.2 Gasboringer

3.2.2.1 Traditionel gasboring

Som det kan ses af figur 3.3, ligner gasboringer etableret med filterrør i princippet almindelige vandboringer, idet boremetoderne er identiske. Indretningen og filtersætningen af boringen er dog anderledes. Boringens afslutning skal tætnes, og der laves foranstaltninger for at reducere den mængde poreluft, der skal bruges for at renpumpe boringen inden prøvetagning. Dette kan f.eks. gøres ved at placere en slange, der går fra toppen af boringen til lige over filteret.

Fordelen ved boringerne er, at der fås oplysninger om, hvilken geologi/fyld der er, dér hvor poreluft prøven udtages. Der kan gentagne gange foretages målinger i boringerne, og flere filtre i forskellige dybder kan anvendes ved en vurdering af den vertikale variation i gaskoncentrationerne.

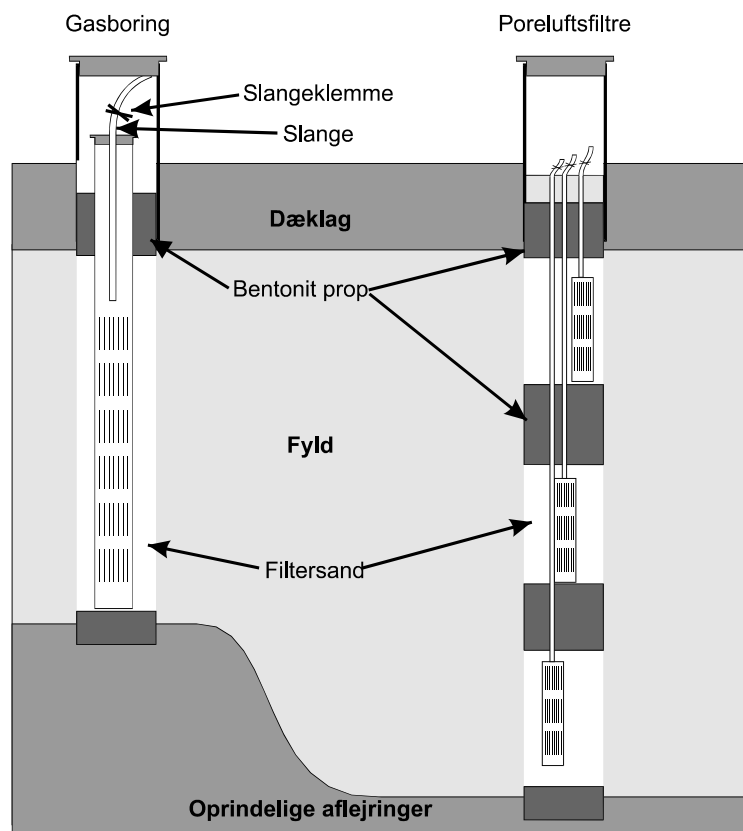
Ved vurderingen af måleresultater fra boringer skal man være opmærksom på, hvor boringen er filtersat. I nogle tilfælde kan boringen være filtersat forkert. Filteret kan f.eks. være placeret helt eller delvist under bunden af lossepladsen, eller det kan være placeret i selve dæklaget. Så selv om boringen tilsyneladende er placeret indenfor lossepladsområdet, kan selve filtersætningen være placeret udenfor fylden, hvilket kan give anledning til fejltolkninger.

For at sikre, at den prøve, der bliver udtaget, repræsenterer poreluften omkring filteret, er det nødvendigt at renpumpe boringen før prøvetagningen i lighed med hvad der sker ved vandprøvetagning. I mange af de tidligere udførte gasundersøgelser er der ikke beskrevet, hvorledes der er foretaget renpumpning før prøvetagningen. Nogle boringer har et forholdsvis stort volumen i selve filtret (0,3 - 2 liter), og da de bærbare gasdetektorer kun pumper med et forholds lille flow (ca. 100 ml/min) kan det være nødvendigt at foretage renpumpningen med en ekstern pumpe. Manglende renpumpning kan f.eks. give sig udtryk i, at der ved de første målinger er ilt i boringen, og at iltkoncentrationen falder ved de efterfølgende prøvetagninger.

3.2.2.2 Poreluftsfiltre

For at kunne måle gaskoncentrationen over flere dybder kan en boring filtersættes i flere dybder. Ved filtersætning over flere dybder kan der dog være problemer med afpropningen mellem filtrene, specielt hvis der skal placeres mere end 2 filtre. Her kan det være en fordel at anvende poreluftsfiltre, som er små filtre (ca. 20-30 cm lange), der er lukket i toppen og i bunden. I stedet for blindrør, er filtrene forsynet med en slange til overfladen, som vist på figur 3.3.

Fordelene ved de små filtre er bl.a., at der kun er et lille meget veldefineret filtervolumen, hvorfor mængden af luft, der skal anvendes til renpumpning, er begrænset. Ulempen ved filterrørene er, at det ikke er muligt at pejle boringerne, for at checke for evt. højtstående grundvandsspejl, samt at filtrene er forholdsvis dyre.



Figur 3.3 Princip for indretning af gasboring og poreluftsfiltre

3.2.3 Indendørsmålinger

Indendørsmålinger udføres sjældent ved en indledende gasundersøgelse. Undersøgelserne kan dog udføres, hvis der er mistanke om, at der er en akut gasrisiko.

Ved planlægning og vurdering af indendørsmålinger er der en række forhold, man skal gøre sig klart. Indendørsmålinger er behæftet med en række usikkerheder: Resultaterne er kun et udtryk for forholdene på måledagen på de respektive målesteder. Det er således ikke muligt at drage konklusioner om koncentrationernes variation med tiden, eller at afgøre om der andre steder i bygningen kan forekomme højere gaskoncentrationer. Det, at der ikke er konstateret metan ved en måling, udelukker derfor ikke, at der kan forekomme metan på andre tidspunkter eller andre steder i bygningen.

Før indendørsmålinger foretages, bør der laves en byggeteknisk gennemgang af bygningerne jf. afsnit 4.2 i dette bilag. Dette gøres for at kunne udvælge de mest kritiske steder til gasmålingerne. Den byggetekniske gennemgang bør desuden indgå i vurderingen af risikoen for gasindtrængning i bygningerne.

Hvis der måles lave koncentrationer af metan - omkring måleapparats detektionsgrænse - kan der være tale om en fejlmåling, f.eks. på grund af interferens fra andre stoffer som rengøringsartikler, hårlak, deodoranter m.v. Det er derfor vigtigt, at der i forbindelse med indendørsmålingerne noteres, om der er lugt af f.eks. kemikalier, og at der i forbindelse med afrapporteringen foretages en vurdering af, om evt. lave gaskoncentrationer kan skyldes andre kilder end lossepladsgas.

Ved indendørsmålinger bør der benyttes måleapparater med en væsentlig lavere detektionsgrænse end ved poreluftsunderøgelser.

Som et supplement kan der udføres målinger af gaskoncentrationen under gulve i bygningerne. I bygninger, hvor der ikke er kælder, kan der foretages målinger gennem huller i fundamentet, medens der i bygninger med kælder kan foretages målinger gennem huller boret i kældergulvet.

3.2.4 Kloakker

Ligesom indendørs målingerne er målinger i kloak- og regnvandsbrønde svære at vurdere. Resultaterne af målingerne er kun et udtryk for forholdene på måledagen på de respektive målesteder. Det er således ikke muligt at drage konklusioner om koncentrationernes variation med tiden, eller at afgøre om der andre steder i kloaknettet kan forekomme højere gaskoncentrationer.

I kloakker og regnvandsledninger vil der ske en biologiske omsætning af det organisk materiale, der skylles med vandet gennem ledningsnettet. Der kan derfor forekomme forhøjede koncentrationer af kuldioxid og eventuelt metan i ledningsnet og brønde, uden at dette er et tegn på, at der sker en indtrængning af lossepladsgas fra det omkringliggende fyld. Ved tolkningen af målinger i kloakker og brønde er det vanskeligt at skelne mellem gas, der er produceret i ledningsnettet og indtrængningen af lossepladsgas fra fylden. Meget høje koncentrationer af metan vil dog oftest skyldes indtrængning af lossepladsgas.

3.3 Måleparametre

Ved måling af lossepladsgas i poreluften foretages der i hvert målepunkt måling af følgende fire parametre:

- Trykdifferens
- Metan (CH_4)
- Kuldioxid (CO_2)
- Ilt (O_2)

3.3.1 Trykmåling

For at vurdere gasproduktionen i lossepladsen kan målingerne af gaskoncentrationerne suppleres med målinger af trykket i poreluften i fyldet. Trykmålingerne foretages normalt ved måling af differencen mellem atmosfæren og poreluften (over-/undertryk i poreluften).

Målinger af poreluftstrykket kan kun foretages i permanente jordspyd eller filtersatte borer, idet "ligevægten" mellem trykket i målesonden og poreluften er længe om at indstille sig. Det er derfor vigtigt, at borer eller jordspyd har været tæt lukkede indtil trykmålingen foretages, og at der ikke har været foretaget pejling af grundvandsstanden, er foretaget renpumpning eller er udtaget poreluftprøver umiddelbart før trykmålingen foretages.

Trykmålinger foretages derfor altid som det første, før renpumpningen og gasmålingerne, og boringen skal være lukket tæt i mindst 24 timer før trykmålingen. Boringen må således ikke være åbnet før trykmålingen

foretages. Målingen foretages med væskebarometer eller en elektronisk trykdifferensmåler, f.eks. af typen Eurogauge micromanometer.

Foruden en vurdering af gasproduktionen i pladsen kan trykmålingerne også anvendes ved vurderinger af gasudsvivningen fra pladsen. Målingerne foretages normalt kun i boringer eller jordspyd, der er placeret i selve lossepladsen.

Fejlkilder

I ældre lossepladser vil porelufttrykket normalt ligge i intervallet $\div 0,05$ mbar til 0,10 mbar ($\div 0,05$ hPa til 0,1 hPa) overtryk. Meget høje over- eller undertryk vil indikere, at der er vand i boringen. Hvis vandspejlet i en boring står over filteret, vil ændringer i vandspejlets højde virke som et stempel og dermed give meget høje over- eller undertryk.

3.3.2 Renspumpning

Før gasmålingerne udføres, skal der foretages en renpumpning af boringen, således at man er sikker på, at den gas, der måles på, repræsenterer poreluften i jorden/fyldet. Ved en renpumpning tømmes filteret for poreluft to til tre gange. Det er vigtigt, at der under renpumpningen ikke pumpes for hurtigt eller for længe, idet der herved kan trækkes atmosfærisk luft ned i poreluften omkring filteret. Der bør derfor maksimalt bruges en pumpeydelse på 1-3 liter/minut. Det anbefales, at der til renpumpningen anvendes en separat pumpe f.eks. en SKC-pumpe.

3.3.3 Gasmåling

Gasmålingen udføres med en bærbar gasdetektor. Tabel 3.2 angiver hvilke parametre og hvilke intervaller, gasmåleren bør kunne måle.

Tabel 3.2 Måleparametre for gasmåler

Parameter	Måleinterval	Usikkerhed
Metan (CH ₄)	0 - 100 vol. %	$\pm 0,5$ vol %
Kuldioxid (CO ₂)	0 - 50 vol %	$\pm 0,5$ vol %
Ilt (O ₂)	0 - 20 vol %	$\pm 1,0$ vol %

Nogle gasmålere kan desuden måle det absolutte tryk (i boringen eller i udeluften) og temperaturen på den oppumpede gas.

3.3.4 Procedure for gasmåling

Før en gasmålerunde startes, checkes det, at udstyret måler rigtigt. Det vil sige, trykmåleren checkes, og gasmåleren afprøves på nogle standardgasser, f.eks. standardgasser med henholdsvis 2 vol % metan, 10 vol % metan og 2 vol % kuldioxid, samt endelig atmosfærisk luft. Resultaterne af målingerne med standardgas og atmosfærisk luft noteres i lighed med målingerne i gasboringerne. Efter endt målerunde eller hvis der under målingerne er mistanke om, at udstyret viser fejlmålinger, checkes udstyret igen.

Ved gasmålinger i en boring eller et jordspyd gås frem efter følgende procedure:

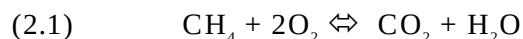
- Trykdifferensen mellem boringen og atmosfæren måles, idet måleren tilsluttes slangen og slangeklemmen åbnes.

- Boringen renpumpes med vakuumpumpe svarende til tømning af filteret 2-3 gange.
- Koncentrationen af metan, kuldioxid og ilt måles med bærbart gasmåleudstyr.
- Gasmåleren renpumpes med atmosfærisk luft, og det checkes, at metan- og kuldioxidkoncentrationerne bliver 0,0 vol %, og at iltkoncentrationen bliver ca. 20 - 21 vol %.

3.4 Fejlmålinger

Høje koncentrationer af metan og ilt samtidig

Jordspyd og boringer kan være utætte, således at atmosfærisk luft blandes med poreluft under prøvetagningen. I jorden vil der under aerobe forhold foregå en omdannelse af metan til kuldioxid (se reaktion 2.1). Hvis der derfor i en boring måles høje koncentrationer af metan ($\text{CH}_4 > 5 \text{ vol } \%$) og aerobe forhold ($\text{O}_2 > 5 \text{ vol } \%$), er dette en indikation på, enten at boringen er utæt, at der ikke er foretaget en tilstrækkelig renpumpning, eller at der er foretaget en alt for voldsom renpumpning, hvor atmosfærisk luft er suget ned i jorden ved renpumpningen.



Specielt i perioder med megen nedbør og i tøvejr kan det ske, at der kommer så meget vand ind i boringen/jordspydet, at vandspejlet i boringen står over filterstrækningen (vand i boringen). Ved prøvetagningen kan der derfor ikke suges poreluft ind i boringen, og en eventuel måling vil derfor blive foretaget på den "gamle" luft i boringen. Såfremt der konstateres vand eller vakuum i boringen, bør måleresultaterne kun benyttes med varsomhed.

Vand i en boring vil også influere på eventuelle målinger af porelufttrykket og vil normalt bevirke, at der "måles" et stort overtryk eller et stort undertryk i boringen. Sådanne målinger skal ikke indgå i vurderingerne af porelufttrykket i pladsen.

Summen af komponenterne er større end 100 vol. %

Ved målinger af ren lossepladsgas kan de målte koncentrationer af metan og kuldioxid tilsammen overstige 100 vol. %. For eksempel kan koncentrationerne måles til 64 % metan og 38 % kuldioxid. Dette skyldes normalt, at måleusikkerheden ofte er forholdsvis stor på de bærbare gasmålere, som oftest anvendes i Danmark. Usikkerheden ved målingerne er dog oftest uden betydning for vurderingerne, idet det er koncentrationsniveauer frem for den eksakte værdi, der er vigtige ved vurderingerne. Hvorvidt der er tale om 64 eller 60 % metan er således uden betydning. Man bør dog være opmærksom på, om kalibreringen af instrumentet er i orden.

Iltkoncentrationer over 21 vol. %

Iltkoncentrationen i atmosfæren er 20,8 vol. %. Hvis der måles iltkoncentrationer over 21 vol. %, er dette således en indikation på, at der er en fejl i kalibreringen af måleinstrumentet.

3.5 Gaskoncentrationer

I modsætning til traditionelle jord- og grundvandsforureninger kan koncentrationen af lossepladsgas som nævnt variere meget over en kort

tidsperiode (dage). Ved vurdering af måleresultater fra gasmålinger tales der derfor i højere grad om koncentrationsniveauer end om den eksakt målte værdi. For at skabe konsistens i de anvendte termer foreslås der benyttet følgende inddeling af koncentrationsintervaller ved beskrivelsen af målte koncentrationer i poreluften:

Tabel 3.3 Betegnelse for koncentrationsintervaller ved lossepladsgasundersøgelser

Poreluft	Metan	0 - 1 vol % CH ₄	"Spor"
		1 - 5 vol % CH ₄	"Lave koncentrationer"
		* 5 - 20 vol % CH ₄	"Lave/høje koncentrationer" *
		> 20 vol % CH ₄	"Høje koncentrationer"
	Kuldioxid	> 6 vol % CO ₂	"Forhøjede koncentrationer"
Indendørs	Metan	> 5 vol % O ₂	"Aerobe forhold"
		0 - 0,1 vol % CH ₄	"Spor"
		0,1 - 0,5 vol % CH ₄	"Lave koncentrationer"
		> 0,5 vol % CH ₄	"Høje koncentrationer"

* For metankoncentrationer mellem 5 og 20 vol % vil det være andre forhold, der spiller ind ved vurderingen af, om koncentrationerne vurderes som høje eller lave

4 Supplerende undersøgelse

Formålet med evt. supplerende undersøgelser vil afhænge af en lang række forskellige forhold som f.eks. de fysiske forhold i lossepladsen, geologien, hydrogeologien samt afstanden til og typen af de nærmeste bygninger. Forholdene vil også bevirke, at omfanget og strategien af undersøgelserne vil variere fra losseplads til losseplads. I dette afsnit vil der derfor ikke blive givet en egentlig beskrivelse af, hvad en supplerende undersøgelse skal indeholde men snarere nogle ideer til, hvilke elementer de supplerende undersøgelser kan indeholde.

På baggrund af de oplysninger, der er indsamlet i orienteringsfasen og ved den indledende undersøgelse, kan der foretages en risikovurdering som beskrevet i hovedrapportens kapitel 3. Ved risikovurderingen gennemgås alle de væsentlige aspekter i forbindelse med gasindtrængning. For at foretage risikovurderingen vil det være nødvendigt at gøre en række antagelser om nogle af de forhold, som ikke er belyst ved de udførte undersøgelser, f.eks. permeabiliteten i den umættede zone eller utætheder i bygningskonstruktionen. Ud fra risikovurderingen vil det være muligt at pege på de faktorer, som er vigtigst af få yderligere belyst ved de supplerende undersøgelser.

Formålet med de supplerende undersøgelser er således at få afklaret de forhold, som risikovurderingen peger på er de vigtigste for vurderingen af gasrisikoen. Ved udvælgelsen af hvilke forhold, der skal undersøges, skal der dog også tage udgangspunkt i, hvad der er økonomisk og praktisk muligt at undersøge.

Overordnet set er de forhold, som oftest skal belyses:

- Vurdering af gasmigrationen
- Vurdering af gasindtrængning i bygningen.

Vurdering og fastlæggelse af gasproduktionen kan også være en af de faktorer, der er kritisk, specielt i lossepladser med meget lav gasproduktion.

4.1 Undersøgelse af gasmigration

Ved risikovurdering af gasmigrationen uden for lossepladsen er der to forhold, der skal vurderes: 1) Er gasvolumenet i lossepladsen tilstrækkeligt stort, til at der vil ske gasmigration frem til bygningen, og 2) Størrelsen af den gasmigration, der sker, vurderes ud fra Darcy's lov.

4.1.1 Gasfanens udbredelse

Ved vurderingen af, om lossepladsen er tilstrækkeligt stort til, at der vil ske gasmigration frem til bygningen, skal der reelt ske en vurdering af gasfanens udbredelse. Ved risikovurderingen er bestemmelsen af gasfanens maksimale udbredelse ($L_{\max}$) behæftet med megen usikkerhed. Umiddelbart ville det være lettest at bestemme gasfanens udbredelse ved en undersøgelse, men på grund af den dynamik, der er i de forhold, der styrer gasmigrationen, er dette dog ikke nogen simpel sag.

Som beskrevet i bilag 1, afsnit 3 vil en given gasfanens udbredelse variere meget over tiden, bl.a. afhængigt af de meteorologiske forhold og årstidsvariationerne. For at kunne bestemme den maksimale udbredelse af gasfanen, er det derfor nødvendigt at foretage målingerne på det rigtige tidspunkt.

Specielt i de øvre jordlag vil der ske en mikrobiel oxidation af metan til kuldioxid. Oxidationen er meget temperaturafhængig, og metanoxidationen vil derfor være størst om sommeren og mindst om vinteren. I vinterperioder vil jordoverfladen kunne være lukket af nedbør over længere perioder, hvilket mindsker den atmosfæriske lufts nedtrængning i jorden, hvilket ligeledes vil mindske metanoxidationen. En lukket jordoverflade vil også bevirke, at gasmigrationen vil øges, da poreluften ikke kan undslippe til atmosfæren.

I forbindelse med udarbejdelsen af bilag 1 er der sammenstillet data om bl.a. atmosfæretrykket målt på Risø i årene 1997-1999. Målinger viser, at de mest stabile vejrforhold er i månederne juni - august, hvor atmosfæretrykket svinger med ca. 30 hPa. De mest ustabile vejrforhold er i vintermånederne december - februar og tildels i marts, hvor atmosfæretrykket varierer med mere end det dobbelte end tilfældet er om sommeren.

På den baggrund vurderes det, at der i vintermånederne er størst mulighed for at foretage målinger under forhold, hvor gasfanen har den største udbredelse.

Målingerne foreslås foretaget i borer eller jordspyd, der er placeret mellem lossepladsen og den/de bygning(er), hvor der er en potentiel gasrisiko. For at få størst mulighed for at foretage målingerne under optimale forhold, foreslås målingerne foretaget som kontinuerte målinger, hvor der foretages en måling ca. hver time i en periode over 7-14 dage.

Målestedernes placering vil afhænge af de konkrete forhold. For at placere filtrene i den rigtige dybde, kan det være en fordel først at få udført en række sonderinger med f.eks. CPT-udstyr eller GeoProbe, hvor der foretages målinger af gaskoncentrationen i forskellige dybder.

4.1.2 Vurderinger ud fra Darcy's lov

Ved vurdering af i hvor høj grad de geologiske forhold begrænser gasmigrationen, anvendes Darcy's lov. En af de faktorer, der har stor indflydelse på resultatet, er jordens gaspermeabilitet. Jordens gaspermeabilitet kan bestemmes ved hjælp af en ventilationstest, i lighed med dem, der udføres ved dimensionering af in situ-anlæg. Ventilationstesten er en prøvepumpning, hvor der i stedet for grundvand pumpes på poreluften i den umættede zone. Hverken Miljøstyrelsen eller Amternes Videncenter for Jordforurening har udarbejdet vejledninger for ventilationstest. Under CEVENT projektet arbejdes der dog på at indsamle og bearbejde de danske erfaringer med in situ-oprensninger, og herunder også ventilationstest. Oliebranchens Miljøpulje har fået udarbejdet en manual for ventilationstest /8/, ligesom bl.a. amerikanske myndigheder har fået udarbejdet vejledninger for ventilationstests /9/. For uddybende beskrivelser af udførelsen af ventilationstests henvises til disse publikationer.

4.2 Undersøgelse af gasindtrængning i bygninger

Undersøgelse af gasindtrængningen i bygninger kan naturligvis foretages ved at måle gaskoncentrationen i bygningen. Målingerne i sig selv giver dog kun et øjebliksbillede af gaskoncentrationen på det pågældende sted, hvor målingen er udført, og kun i meget sjældne tilfælde vil målingen alene kunne anvendes til at vurdere i hvilket omfang gasindtrængning i bygningen sker, og hvor stor gasindtrængningen vil være i kritiske situationer. For at kunne foretage en egentlig vurdering af gasindtrængningen i bygningen er det derfor nødvendigt at kombinere gasmålingerne med en byggeteknisk gennemgang. Den byggetekniske gennemgang har dels til formål at belyse, hvor i bygningskonstruktionen der er risiko for gasindtrængning, og dermed hvor gasmålingerne skal foretages, dels at belyse i hvor stort et omfang den indsivende gas vil blive fortyndet og ventileret bort.

Som ved de øvrige undersøgelser vil den byggetekniske gennemgang også kunne opdeles i to dele, en dataindsamling og en besigtigelse/undersøgelse af bygningen.

4.2.1 Byggetekniske oplysninger

Indhentning af byggetekniske oplysninger kan i nogle tilfælde indhentes allerede i forbindelse med orienteringsfasen eller den indledende gasundersøgelse. Dette vil dog normalt kun være formålstjenligt for lossepladser, hvor det allerede på forhånd vides, at der evt. er stor akut risiko for gasindtrængning i bygningen(-erne). Oftest vil byggetekniske oplysninger først skulle indhentes i forbindelse med de supplerende gasundersøgelser, hvor gasproduktionen er kortlagt.

Byggetekniske oplysninger bør som minimum indeholde oplysninger om:

- Bygningens alder
- Bygningens type
- Bygningens konstruktioner her under særligt
 - Fundaments-, kælder- og bjælkeopbygning
 - Gulvkonstruktion
 - Rør- og ledningsgennemføringer
- Adgangsforhold og brugsmønster
- Ventilationsforhold

4.2.2 Byggeteknisk gennemgang

Før der foretages målinger af indeluften, bør der som nævnt foretages en byggeteknisk gennemgang. Denne bygningstekniske gennemgang bør som udgangspunkt foretages af en bygningssagkyndig. Som hjælp til den byggetekniske gennemgang har Bygge- og Boligstyrelsen i henholdsvis 1993 og 1994 udgivet to pjecer om undersøgelser og målinger af jordgasser i indeluften /10/ og undersøgelser af lufttæthed i bygningskonstruktioner /11/. Selvom disse to pjecer primært er udarbejdet med henblik på traditionelle jord- og grundvandsforureninger, er pjecerne yderst relevante i forhold til undersøgelser og vurderinger af gasindtrængning i bygninger med lossepladsgas.

I /10/ er givet en detaljeret beskrivelse af hvilke forhold, der skal belyses ved en besigtigelse af en bygning, ligesom der i pjecen gives en detaljeret

beskrivelse af hvilke overvejelser, man skal gøre sig, før der iværksættes et måleprogram for måling af gaskoncentrationerne i indeluften.

I /11/ gives en beskrivelse af hvor i bygningskonstruktionen, der kan forventes at ske gasindsivning, og efter hvilke principper der kan udføres afværgeforanstaltninger til tætning af bygningen.

Målinger af radon

Specielt for bygninger, der ligger uden for lossepladsen, vil gaskoncentrationerne i poreluften under bygningen variere meget. Målinger af gaskoncentrationen i bygningen vil derfor afhænge både af indtrængningen af jordgasser i bygningen og af gaskoncentrationen i poreluften under bygningen. Det kan derfor være svært at opnå et entydigt resultat ved måling af gaskoncentrationerne i indeluften.

Ved bestemmelsen af gasindtrængningen i bygningen kan det derfor være praktisk at anvende en sporgas, som har en konstant koncentration i poregassen under bygningen. Radon er en sådan sporgas og kan anvendes til bestemmelse af gasindtrængningen i bygningen, dels fordi radonkoncentrationen i jorden for en given lokalitet er forholdsvis konstant, dels fordi radonkoncentrationen i jorden er væsentligt højere end i atmosfærisk luft og i indeluft. Radon har desuden den fordel, at gassen er forholdsvis billig at måle for, og målemetoderne er pålidelige /6/.

5 Referencer

- /1/ Oprydning på forurenede lokaliteter. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6 og 7, 1998
- /2/ Grundvandsundersøgelser ved fyld- og lossepladser. Amternes Videntcenter for Jordforurening. Teknik & Administration, nr. 3, 1998.
- /3/ Lossepladsgas. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 69 1993.
- /4/ The Measurement of Methane and Other Gases from the Ground. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) report 131, 1993.
- /5/ Håndbog for Poreluftsundersøgelser. Amternes Videntcenter for Jordforurening. Teknik & Administration, nr. 7, 1998.
- /6/ Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationer i danske enfamiliehuse. Claus E. Andersen m.fl., Forskningscenter Risø, April 1997. Rapport nr. Risø-R-979(DA).
- /7/ Christophersen M. Lateral spredning og emission af gas fra en gammel losseplads. PhD afhandling. Institutet for Miljøteknologi. 28 april 2000
- /8/ Kvalitetsmanual for oprensning af grunde under OM-ordningen. Oliebranchens Miljøpulje. August 1997.
- /9/ Guidance for Design, Installation and Operation of Soil Venting Systems. Wisconsin Department of Natural Resources Emergency and Remedial Response Section, July 1993. PUBL-SW185-93
- /10/ Måling af stoffer i indeluften fra forurening i jorden. Vejledning fra Bygge- og Boligstyrelsen, 1994
- /11/ Undersøgelser af lufttæthed i bygningskonstruktioner. Vejledning fra Bygge- og Boligstyrelsen, 1993

1 Barrierediagrammetoden, teori

1.1 Indledning

I dette kapitel er beskrevet et koncept for risikovurdering baseret på barrierediagrammetoden. Barrierediagrammetoden er oprindelig udviklet til dokumentation af sikkerhedsforhold på virksomheder, der håndterer farlige stoffer jf. Miljøstyrelsens miljøprojekt 112 /1/.

Barrierediagrammernes oprindelige formål var at skabe overblik over komplicerede hændelsesforløb. Diagrammerne kan anvendes til at identificere de hændelsesforløb, der vil være særligt hyppige eller alvorlige, og dermed de steder, hvor flere sikkerhedsforanstaltninger bør være til stede. Barrierediagrammerne kan herigennem anvendes som baggrund for en vurdering af, om sikkerhedsniveauet i et anlæg er acceptabelt.

For gasproducerende lossepladser kan metoden anvendes til en systematisering af de faktorer, som har indflydelse på de hændelsesforløb, der kan resultere i en ulykke, som involverer gassen fra de gasproducerende lossepladser.

Metoden kan desuden anvendes til en semi-kvantitativ analyse af, om sikkerhedsniveauet for en given losseplads er acceptabelt.

Basis for diagrammerne er bl.a. undersøgelser af lossepladsen som beskrevet i bilag 2.

Barrierediagrammernes opbygning og tildeling af point til barrierer følger i det væsentlige Miljøstyrelsens Miljøprojekt 112 /1/.

1.2 Fordele og ulemper ved metoden

Barrierediagrammetoden udmærker sig ved at være operationel i brug. Dokumentationen i form af barrierediagrammer, som afspejler hændelsesforløb og sikkerhedsforanstaltninger, sikrer en forståelig og visuel kommunikation af mulige scenarier.

Kvantificering af, hvor hyppigt ulykker kan forekomme, kan altid give anledning til debat og kan desuden være svær at forstå og acceptere for et bredere publikum. I barrierediagrammetoden omregnes hyppigheder og svigtsandsynligheder, som ofte er små tal, til barrierepoint. Jo bedre en barriere er, des flere point tildeles den. Der kræves flere barrierepoint for alvorlige konsekvenser end for mindre alvorlige konsekvenser. Denne enkle logik gør normalt kvantificeringen mere acceptabel og forståelig for offentligheden.

Metoden bør ikke opfattes som en fuldstændig og meget præcis kvantificering af ulykkesscenarierne, men denne ulempe kan i virkeligheden også tolkes som

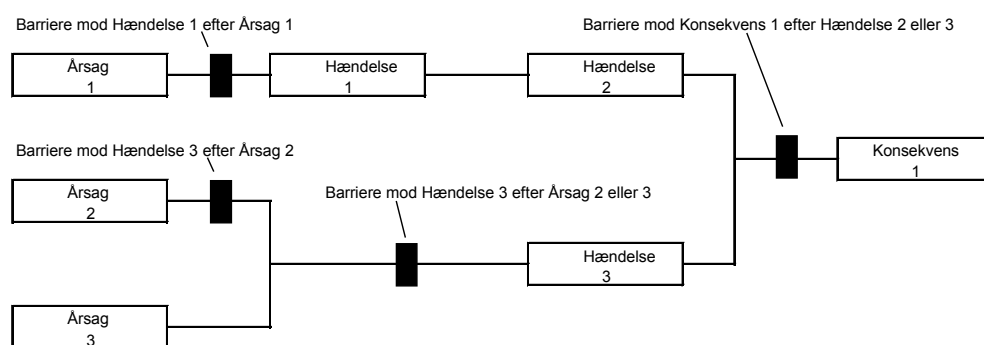
en styrke, idet selv meget “præcise” kvantificeringer i højere grad vil give anledning til diskussion af de benyttede tal og usikkerheden på dem.

1.3 Opbygning af barrierediagrammer

1.3.1 Princip

For at kunne overskue et ulykkesforløb, optegnes det i et diagram som det, der er vist på figur 1.1. I diagrammet præsenteres ulykkens årsager yderst til venstre, og dets konsekvenser yderst til højre. Ulykkens årsager kaldes også udgangshændelser, men af hensyn til udformningen af de efterfølgende figurer er der i disse anvendt teksten “årsag”. Undervejs kan det for overskuelighedens skyld være nyttigt at angive de enkelte hændelser i ulykkens forløb.

På samme diagram indtegnes de sikkerhedsforanstaltninger, der findes mod at en ulykke udvikler sig, så de anførte konsekvenser indtræffer. Sikkerhedsforanstaltningerne er “barrierer”, der forhindrer eller formindsker konsekvenserne, deraf navnet “barrierediagram”.

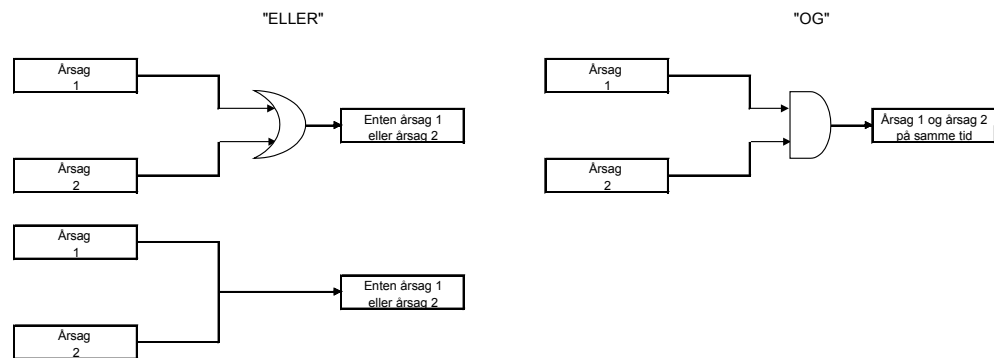


Figur 1.1 Et barrierediagram

Ofte kan flere forskellige “årsager” hver for sig være begyndelsen på samme hændelsesforløb. Det er det, der er illustreret på figur 1.1 ved “årsag 2” og “årsag 3”. Enten “årsag 2” eller “årsag 3” kan føre til “Hændelse 3”, se ovenfor.

Kombinationen kaldes en “ELLER” port. Det officielle symbol er vist på figur 1.2 øverst til venstre, men for nemheds skyld anvendes blot et simpelt sammenløb af grenene.

Lejlighedsvis er en hændelse en kombination af flere årsager. Dette vises i barrierediagrammet som skitseret på figur 1.2. Symbolet er en “OG”-port. Begge “årsager” skal være til stede for at hændelsen kan indtræffe.



Figur 1.2 Notation for "ELLER" og "OG" i barriediagrammer

1.3.2 Barrierer

En barriere er en foranstaltning eller et forhold, som kan hindre en ulykke i at opstå, standse et ulykkesforløb eller begrænse en ulykkes konsekvenser.

Barrierer kan være rent fysiske foranstaltninger som f.eks. etablering af en afværgeforanstaltning (menneske skabt barriere) eller et fysisk eksisterende forhold som f.eks. stor afstand imellem lossepladsen og den bygning, som vurderes (naturlig barriere). Barrierer kan også være "ikke-fysiske" regler for handlinger, f.eks. rygeforbud. Endelig kan barrierer være blandinger af fysiske og ikke-fysiske foranstaltninger, f.eks. en alarm for høj gaskoncentration, som vil få en beboer til at forlade bygningen.

I det efterfølgende er der ikke skelnet mellem barrierer, som kræver manuelt indgreb, og barrierer, som ikke kræver manuelt indgreb, men vurderingen af barrierernes effektivitet kan være påvirket af i hvor høj grad den aktuelle barriere er afhængig af, at mennesker handler korrekt i en given situation.

I afsnit 3 i selve rapporten er der givet nærmere beskrivelse af bl.a. følgende barrierer:

- Permeabilitet af lossepladsfylden og omkringliggende jordlag (fysisk naturlig barriere)
- Afstand (fysisk naturlig barriere)
- Indkapsling af losseplads (fysisk menneskeskabt barriere)
- Betondæk under bygning (fysisk menneskeskabt barriere)
- Ventilation (fysisk menneskeskabt barriere)
- Begrænsede antændelsesmuligheder (ikke-fysisk eller fysisk menneskeskabt barriere)

I afsnit 3 i dette bilag er der desuden givet konkrete eksempler på barrierer, som findes på eksisterende lossepladser.

1.4 Point

1.4.1 Begreber

Hændelse

En hændelse er "noget der sker". Begrebet hændelse er benyttet for udgangshændelser, dvs. årsager, mellemliggende hændelser i et hændelsesforløb og sluthændelser, dvs. konsekvenser.

Hyppighed	Hyppighed af en hændelse angiver antallet af hændelser indenfor en bestemt periode. Hyppigheder i denne rapport bør opfattes som forventede hyppigheder på grund af det begrænsede statistiske grundlag for de anvendte størrelser.
Sandsynlighed	Sandsynligheden er den relative hyppighed for, at en bestemt hændelse forekommer i en serie af hændelser, som f.eks. sandsynligheden for at slå en sekser ved mange kast med en terning.
Konsekvenser	Konsekvenser er følgerne af en given hændelse (her sluthændelsen, f.eks. brand eller eksplosion). I risikoanalyse anvendes ordet udelukkende i forbindelse med uønskede konsekvenser, f.eks. dødsfald. Konsekvenstyper er uddybet i forhold til deres alvorlighed i afsnit 1.5.1.
Risiko	Risiko er en kombination af hyppigheden og konsekvensen af en hændelse. Kvantitativ risiko bliver derfor defineret som produktet af hyppigheden af en hændelse og konsekvensen af hændelsen. De største risici forekommer, når hyppigheden af en hændelse er stor, og konsekvensen er stor. Små og ubetydelige risici forekommer, når hyppigheden af hændelsen er lille og konsekvensen ubetydelig.
Barriere	En barriere er en foranstaltning eller et forhold, som kan hindre en ulykke i at opstå, standse et ulykkesforløb eller begrænse en ulykkes konsekvenser. Barrierediagrammerne benyttes til at skabe et overblik over hvilke hændelsesforløb, der kan forventes at indebære den største risiko (mest hyppige og/eller de alvorligste konsekvenser) - og dermed finde de steder, hvor ekstra sikkerhedsforanstaltninger eventuelt er påkrævet. Såvel årsager som barrierer tildeles point svarende til hyppighed eller pålidelighed. Ved summation af pointene kan man umiddelbart identificere hændelsesforløb med for få point (svarende til en for stor hyppighed for at konsekvensen indtræffer). Sandsynlighed bruges i det danske dagligdags sprog ofte synonymt med hyppighed. Det er derfor vigtigt, at bemærke den matematiske forskel på hyppighed og sandsynlighed (relativ hyppighed). En hyppighed vil altid være knyttet til en tidsenhed, f.eks. 2 gange om ugen, 1 gang om året eller 5 gange på 1000 år. Sandsynligheden er i modsætning hertil altid dimensionsløs, f.eks. sandsynlighed for at vinde i tips (f.eks. 1 gang pr. 1,6 millioner gange) eller som sandsynligheden for at gas antændes (typisk 10 % eller 1 udslip ud af 10 udslip antændes). Bemærk også, at begrebet risiko i denne sammenhæng er defineret mere "matematisk" præcist end i den gængse brug af ordet i det danske sprog. I almindelig dansk sprogbrug opfattes risiko blot som muligheden for at en ubehagelig ting sker. Ved risikovurderinger er det nødvendigt, at forholde sig til den forventede hyppighed af uønskede hændelser, ellers kan man ikke foretage saglige og prioriterede valg af f.eks. sikkerhedsrelevante løsninger.

1.4.2 Pointsystem

Til pointgivningen skal man vurdere:

- Hvor hyppigt “årsagen” optræder
- Hvor sandsynlige nødvendige forudsætninger er
- Pålideligheden af hver enkelt barriere. Til diagrammet skal bruges sandsynligheden for at barrieren **ikke** virker, dvs. svigtsandsynligheden. Hvis barrieren ikke dækker alle forløbets følgehændelser, tages der højde for den manglende dækningsgrad.

Både hyppigheder og svigtsandsynligheder må forventes at være meget små størrelser, typisk af størrelsesorden 0,001 eller 10^{-3} . For at slippe for de små tal og for at lette kombinationen udtrykkes de små tal i point.

For hyppigheder af udgangshændelserne tildeles point som vist i tabel 1.1. Tabellen tager udgangspunkt i de hyppighedsklasser (H-værdier), der er angivet i 1/. I stedet for at benytte hyppighedsklasser anvendes hyppighed for hændelser pr. år, dvs. en hændelse, der indtræffer 1 gang pr. år tildeles 0 point, dette svarer til en detaljering af hyppighedsklasserne. Desuden kan anvendes en finere inddeling af intervallerne for hyppigheder, når hyppigheden kan vurderes bedre ud fra undersøgelse af den aktuelle losseplads, se afsnit 3.3 i rapportdelen.

Tabel 1.1 Tildeling af point for hyppighed af udgangshændelser (årsager)

Beskrivelse af hyppighedsklasse	H-værdi	Hyppighed	Point
Hyppig hændelse, to eller flere pr. uge	H = 6	1 gang hver dag	-5
		100 gange om året	-4
Almindelig hændelse, en eller flere pr. år, men mindre end to pr. uge	H = 5	1 gang hver uge	-3
		1 gang hver måned	-2
		1 gang hver 3. Måned	-1
		1 gang hvert år	0
Ualmindelig hændelse, under en gang pr år, men oftere end en gang pr. 100 år	H = 4	1 gang hvert 3. År	1
		1 gang hvert 10. År	2
		1 gang hvert 30. År	3
		1 gang hvert 100. År	4
Sjælden hændelse, under en gang pr. 100 år	H = 3	1 gang hver 1.000 år	6
		1 gang hver 10.000 år	8
Meget sjælden hændelse, under en gang hver 10.000 år	H = 2	1 gang hver 10^5 år	10
		1 gang hver 10^6 år	12
Yderst sjælden hændelse, under 1 gang hver million år	H = 1		>12
Hændelse, hvis sandsynlighed ikke kan beregnes pga. dens uforudsigelige eller irrationelle karakter, f.eks. sabotage	H = X		-

For svigtsandsynligheder gælder, at en barriere tildeles 2 point, hvis den reducerer sandsynligheden for, at hændelsesforløbet udvikler sig yderligere med en faktor 10. I det efterfølgende er angivet eksempler på sammenhængen mellem svigtsandsynlighed og barrierepoint:

Tabel 1.2 Tildeling af point til svigtsandsynligheder og forudsætninger

Beskrivelse af svigtsandsynlighed	Sandsynlighed	Point
Barrieren har ingen effekt, den virker aldrig	1	0
Barrieren svigter hyppigt, den har ingen effekt ca. hver anden gang	0,4-0,7	0,5
Barrieren har ingen effekt ca. hver 3 gang	0,3	1
Barrieren har ingen effekt ca. hver 10. Gang	0,1	2
Barrieren svigter sjældent, kun ca. en gang ud af 100 gange	0,01	4
Barrieren svigter meget sjældent, ca. en gang ud af 1.000 gange	0,001	6

Med den valgte basis for hyppighed bliver sammenhængen imellem point, p og svigtsandsynlighed/hyppighed, h givet ved ligningen:

$$p = -2 \cdot \log(h)$$

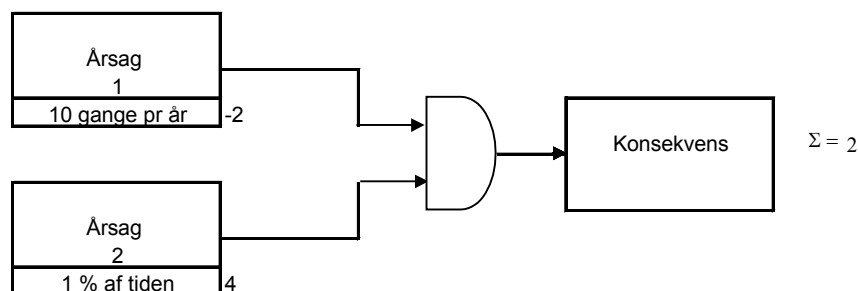
Når hyppigheder og sandsynligheder skal kombineres, skal de ganges med hinanden. Når point skal kombineres, skal man lægge dem sammen.

Ved at kombinere hyppigheder for årsager og sandsynligheder for barriere-svigt fremkommer nye hyppigheder, nemlig hyppighederne for konsekvenserne. Pointsummen er således et groft udtryk for, hvor sjældent den angivne konsekvens forekommer.

1.4.3 Regneregler

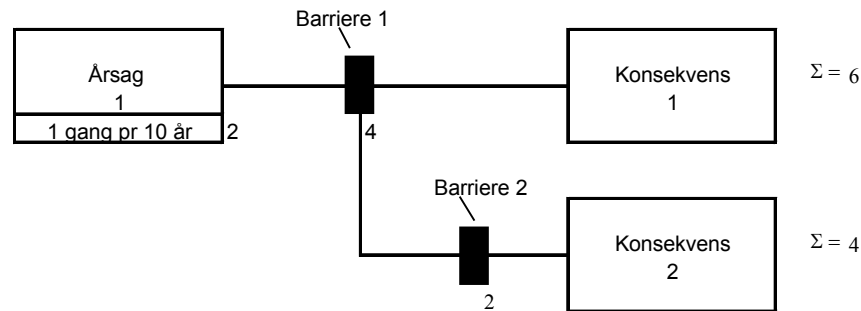
Når alle porte i diagrammet er “ELLER”-porte, er summationen enkel. Hver vej gennem diagrammet betragtes for sig.

Møder man imidlertid en “OG”-port, skal pointene i den tilstødende gren også lægges til. Det er sådan, at når en årsag og en forudsætning (betinget årsag) skal indtræffe på samme tid, for at en hændelse kan finde sted, må den ene udtrykkes som den brøkdelen af tiden, den vil være til stede. Det er illustreret på figur 1.3. Årsag 2 er en såkaldt betinget årsag, dvs. en nødvendig forudsætning for at konsekvensen kan indtræffe. Point for sandsynlighed af forudsætninger tildeles efter tabel 1.2.



Figur 1.3 Summation ved “OG”-port

Hvis en barriere begrænser en ulykkes konsekvenser, men ikke fjerner enhver uønsket virkning, vil barrierediagrammet se ud som illustreret på figur 1.4.



Figur 1.4 Summation ved forskellige konsekvenser

Pointsummen for den øverste række, svarende til konsekvens 1 beregnes ved at summere point for hyppigheden af årsagen og point for pålidelighed af barriere 1. Pointsummen for den nederste række, svarende til konsekvens 2 beregnes ved at summere point for hyppigheden af årsagen og point for barriere 2. Pointsummen noteres til højre for konsekvenserne i samme lodrette rækkefølge som årsagerne.

1.5 Vurdering af sikkerhedsniveau

Når man har udstyret sit barrierediagram med point, kan man anvende det til at vurdere, om den risiko, hændelsesforløbene udgør, er for stor. For at kunne gøre dette, skal man bruge følgende:

- En vurdering af omfanget af konsekvenserne
- Et ønsket sikkerhedsniveau.

1.5.1 Konsekvensvurderinger

For at vurdere konsekvensernes omfang kan det være nødvendigt at gennemføre konsekvensberegninger. F.eks. bestemmes mængden og/eller raten af gas, der trænger ind i en bygning, mulige koncentrationer i bygningen og evt. mulige konsekvenser. I andre tilfælde må konsekvenserne vurderes konservativt eller baseres på erfaring.

Konsekvenserne kan inddeles i klasser afhængigt af omfang. Hver klasse tildeles en såkaldt “K-værdi”.

Efterfølgende tabel 1.3 er en omskrivning af de konsekvensklasser, som sædvanligvis anvendes på procesanlæg og deres omgivelser /1/.

“K-værdierne” anvendes til hel eller delvis kvantificering af konsekvenser og hermed implicit risikoniveauet.

“K-værdier” er bibeholdt med samme størrelsesorden for skadesomfang, som anvendt i procesindustrien. Teksten er dog tilpasset således, at den afspejler relevante begreber i forbindelse med lossepladser.

At der anvendes udtrykket “mulighed for personskade” skyldes:

- at der ved konsekvensberegninger generelt beregnes afstande o.lign. til en vis del af omkomne, f.eks. 50% i forhold til de, der er udsatte
- at det ikke er sikkert, at der overhovedet er personer inden for det område, hvor ulykkens konsekvenser rammer.

Tabel 1.3 Oversigt over “K”-værdier/konsekvensklasser og omfang af konsekvenserne

“K-værdi” Konsekvens- klasse	Omfang	Beskrivelse
0	Ingen konsekvenser	Hændelser, som ikke medfører farer.
1	Ubetydelige konsekvenser	Hændelser, der medfører mindre forstyrrelser, men ikke farer.
2	Mærkbare konsekvenser	Der er ikke tale om skader på personer eller miljø, men kun i mindre omfang skade på bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.
3	Betydelige konsekvenser	Der er mulighed for mindre alvorlige personskader og/eller betydelig beskadigelse af bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.
4	Alvorlige konsekvenser	Der mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen.
5	Stor ulykke	Der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede blandt personer uden relation til lossepladsen.

1.5.2 Sikkerhedsniveau

Det ønskede sikkerhedsniveau repræsenteres ved en række krav til det mindste antal point, der skal opnås i hvert hændelsesforløb, relativt til konsekvensklassen.

Ved fastsættelsen af sikkerhedsniveauet må man gøre sig klart, at hændelsesforløb, der grupperes i konsekvensklasserne 3 og højere, vil have offentlighedens opmærksomhed, da de kan resultere i person- og/eller miljøskader. Ulykkesforløb i gruppe 2 og lavere har alene driftsmæssig og økonomisk betydning.

Når man skal tage stilling til sikkerhedsforhold på og omkring en losseplads, vil det ske efter følgende principper:

- Unødige risici bør fjernes
- Risici bør reduceres, så vidt det er praktisk muligt
- Den individuelle risiko for personer må ikke forøges væsentligt som følge af lossepladsen.

/1/ anbefaler, at den individuelle risiko for dødsfald for den mest udsatte nabo skal være mindre end 10^{-6} pr. år. Dette tal kan også anvendes for andre personer, som ufrivilligt udsættes for en risiko pga. gasproducerende lossepladser.

Fra statistisk materiale om arbejdsulykker kan man udlede, at FAR-tallet (fatal accident rate pr. 10^8 timers arbejde) for medarbejdere i kemisk industri er 4,3 og for landbrug er FAR-tallet 5,5 /2/. Med en arbejdstid på 1700 timer

pr. år kan et FAR-tal på 5,5 omregnes til en hyppighed for dødsfald efter ulykker på arbejdspladsen på 10^{-4} pr. år pr. medarbejder. Nogle brancher har en væsentlig højere hyppighed for dødsfald efter ulykker på arbejdspladsen, f.eks. byggebranchen, hvor tallet er $7-16 \cdot 10^{-4}$ pr. år pr. medarbejder /2/.

1.5.3 Vejledende eksempel for bygning på eller nær losseplads

På baggrund af ovenstående anbefales følgende minimumskrav til antal barrierepoint ved vurdering af en bygning på eller i nærheden af lossepladsen. Det anbefalede minimumskrav til antal barrierepoint sikrer, at man opnår et sikkerhedsniveau, som anført under tabel 1.4.

Det er forudsat, at der kun er én udgangshændelse, som kan medføre skader iht. de anførte konsekvensklasser.

Det forventes, at man f.eks. undersøger 2-3 bygninger med forskellig lokalisering i forhold til lossepladsen, for at opnå en samlet vurdering af lossepladsen. De anbefalede krav til barrierepoint skal så være opfyldt for hver enkelt bygning.

Hvis bygningen vurderes at have særlig værdi eller anvendes til særligt sårbare formål, f.eks. historiske bygninger hhv. vuggestuer, bør det overvejes at stille skærpede krav til antallet af barrierepoint og hermed sikkerhedsforanstaltninger.

Tabel 1.4 Anbefalede minimumskrav til antal barrierepoint

Beskrivelse	Omfang	"K-værdi"	Barrierepoint
Der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede blandt personer uden relation til lossepladsen.	Stor ulykke	5	12
Der mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen.	Alvorlige konsekvenser	4	8
Der er mulighed for mindre alvorlige personskader og/eller betydelig beskadigelse af bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.	Betydelige konsekvenser	3	4
Der er ikke tale om skader på personer eller miljø, men kun i mindre omfang på bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.	Mærkbare konsekvenser	2	2
Hændelser, der medfører mindre forstyrrelser, men ikke farer.	Ubetydelige konsekvenser	1	0
Hændelser, som ikke medfører farer.	Ingen konsekvenser	0	-

Sammenligner man de opstillede pointkrav svarende til klassebeskrivelsen med de hyppigheder, der er nævnt ovenfor i tabel 1.4, ser man, at det ønskede sikkerhedsniveau er således:

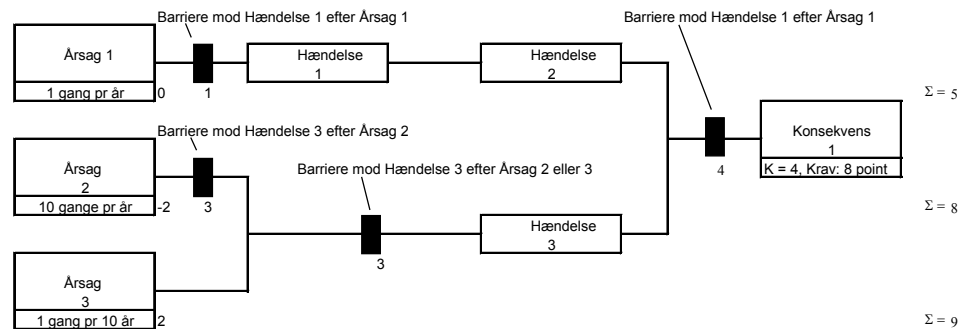
- De 12 point, der er krævet for personskade uden for lossepladsen svarer til, at det enkelte hændelsesforløb udsætter en 'gennemsnitsnabo' for dødsfald med en hyppighed på 10^{-6} pr. år.
- De 8 point, der er krævet for enkelte dødsfald blandt medarbejdere eller varige skader svarer til en ulykkeshyppighed på $1 \cdot 10^{-4}$ pr. år.

- De 4 point, der er krævet for $K=3$ svarer med ét hændelsesforløb til en hyppighed af sådanne ulykker på 10^{-2} pr. år.
- De 2 point, der er krævet for $K=2$ svarer med ét hændelsesforløb til en hyppighed af sådanne ulykker på 0,1 pr. år.
- De 0 point, der er krævet for $K=1$ svarer med et hændelsesforløb til en hyppighed af sådanne ulykker på 1 pr. år.

1.5.4 Det færdige barrierediagram

Figur 1.5 viser barrierediagrammet fra figur 1.1 forsynet med acceptkrav.

Det ses umiddelbart, at acceptkravet ikke er opfyldt for det øverste hændelsesforløb, startende med “årsag 1”. Kravet er opfyldt for de 2 nederste hændelsesforløb, startende med “årsag 2” eller “årsag 3”.



Figur 1.5 Det færdige barrierediagram

2 Generelle barrierediagrammer

2.1 Indledning

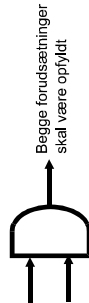
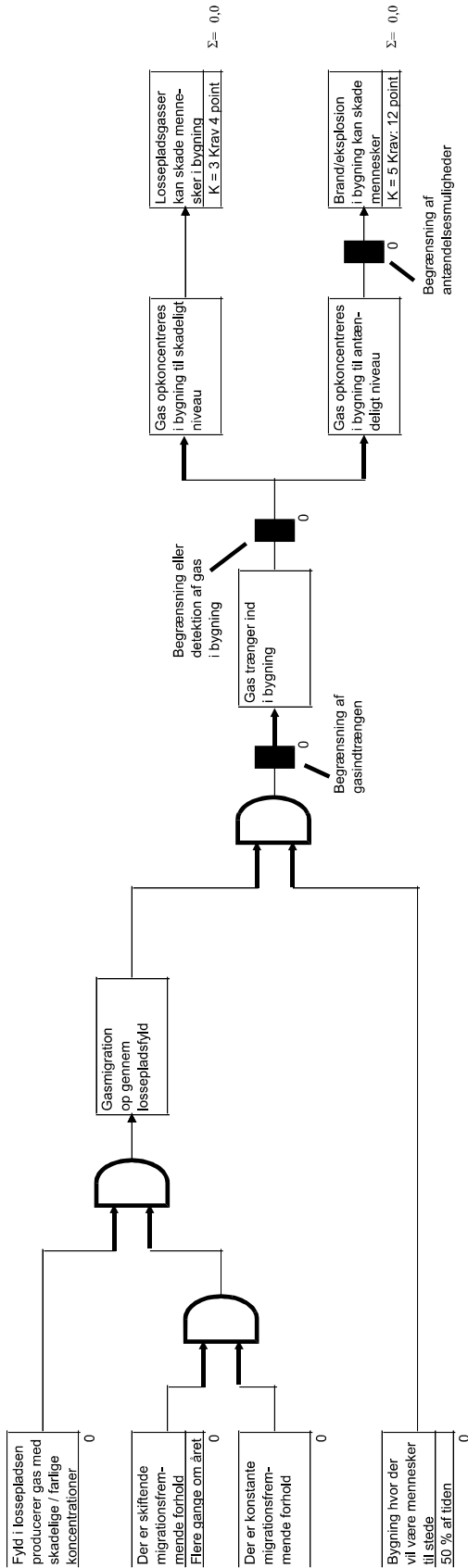
I denne del af bilag 3 er indsat generelle barrierediagrammer for følgende typer ulykkesscenarier:

- Brand/eksplosion i bygning på lossepladsen
- Brand/eksplosion i bygning udenfor lossepladsen
- Brand i forbindelse med gravearbejde på losseplads

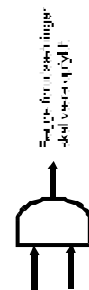
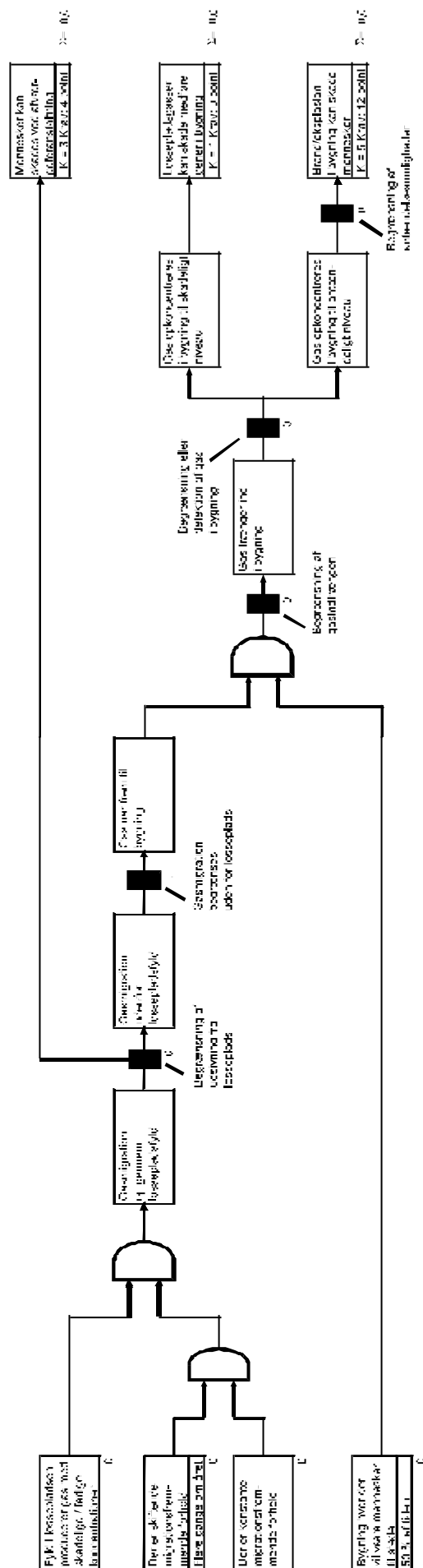
Barrierediagrammerne er udarbejdet iht. kapitel 3 og kan anvendes som basis for risikovurdering af lossepladser i Danmark.

De generelle barrierediagrammer er udarbejdet i Excel og kan rekvireres hos Miljøstyrelsen. Da der ikke ligger en egentlig programudvikling bag disse excel-ark tages der forbehold for brug af disse, idet de ikke er beskyttet mod ændringer, som brugeren måtte foretage. Brug af excel-arkene er derfor kun tænkt som en hjælp og der ydes ikke support til brug af arkene.

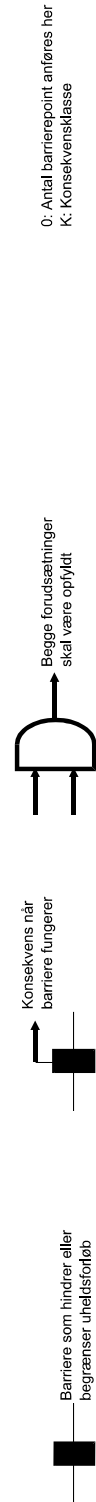
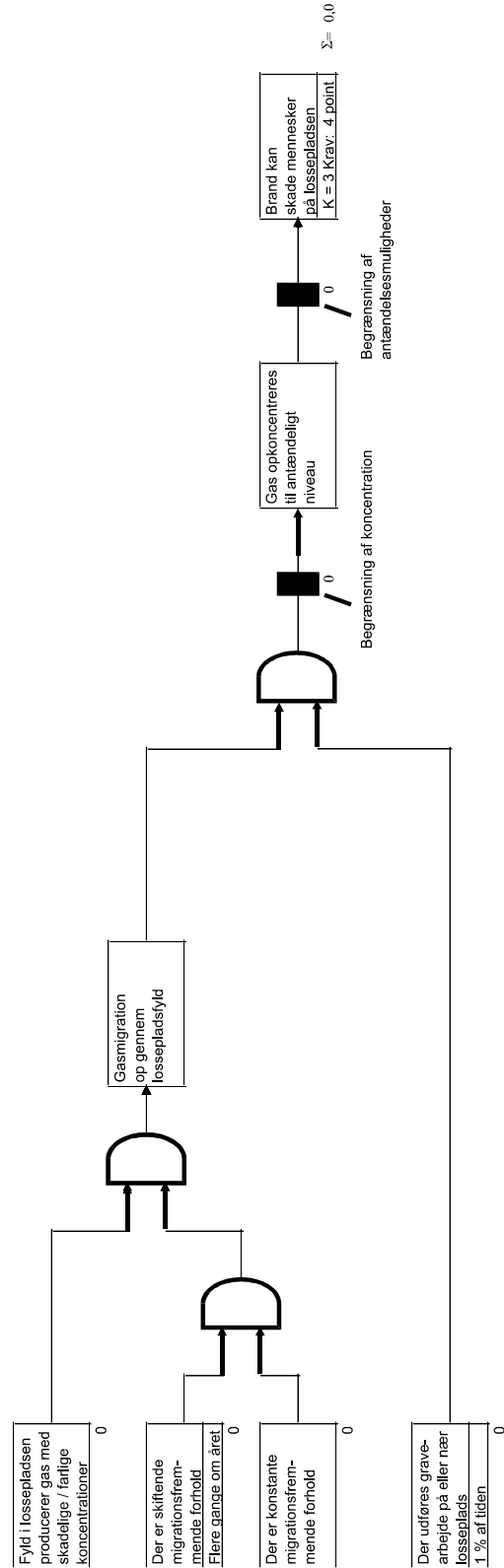
I afsnit 3 i dette bilag er indsat eksempler på konkrete anvendelser af de generelle barrierediagrammer.



0: Antal barrierepoint anføres her
K: Konsekvensklasse



3: A-vod har en positiv indvirkning
K: A-vod har en negativ indvirkning



3 Eksempler på anvendelse

3.1 Indledning

I dette bilag er indsat eksempler på konkrete anvendelser af de generelle barrierediagrammer.

Der er foretaget risikovurdering af følgende lokaliteter, idet anvisningerne i rapportens kapitel 3 er fulgt:

- 1A Lokale i stueplan i erhvervsbyggeri
- 1B Krybekælder under erhvervslokaler – Eksplosion skyldes elinstallationer
- 1C Krybekælder under erhvervslokaler – Eksplosion skyldes håndværker i krybekælder
- 1D Bolig på lille losseplads

- 2A Boligblok placeret uden for stor losseplads
- 2B Bolig placeret uden for stor losseplads

- 3A Gravearbejde på losseplads
- 3B Reparationsarbejde i brønd på losseplads

Eksemplerne 1A-1C og 2A hører til samme losseplads. Eksempel 2B er en risikovurdering af huset, som eksploderede ved Skellingsted losseplads i 1991. Eksemplerne 3A og 3B er udarbejdet for en opdigtet losseplads. De andre eksempler er eksisterende lokaliteter, som er anonymiseret (bortset fra Skellingsted).

Risikovurderingerne er udført mht. brand og eksplosionsfare. Risikovurderingerne er primært udført på baggrund af alvorlige ulykker, som forårsager personskader eller evt. dødsfald. Hvis de anbefalede krav til barrierepoint, og dermed sikkerhedsniveauet er opfyldt for de alvorlige ulykker, vil de anbefalede krav til barrierepoint ved mindre gener også være opfyldt. Gener pga. lossepladsgasser vil også kunne risikovurderes med metoden, men fokus har ikke været rettet så meget herpå, da der ikke haves så mange oplysninger om dette. De rapporterede ulykker (se bilag 5) handler primært om brand- og eksplosionsulykker. Der er dog enkelte rapporteringer om folk, som er blevet evakueret pga. lossepladsgassen (Kilcullen). Årsagen til evakueringen er ikke oplyst.

Scenarierne 1A til 1D er udarbejdet ud fra det generelle barrierediagram nr. 1 vist i forrige bilag og scenarie 2A og 2B samt 3A og 3B er udarbejdet ud fra de generelle scenarie typer 2 hhv. 3.

Det er forsøgt at gøre de generelle scenarier så dækkende, at alle situationer kan håndteres. Ændringer kan selvfølgelig være nødvendige, og skal blot udføres i overensstemmelse med reglerne i bilag 3-1.

3.2

Miljøstyrelsen

Barrierediagram nr. 1A

Losseplads

Bygning

Scenarie

Bykøbing

Hus på matrikel nr. 15-q, Overdrevet

Lokale i stueplan i erhvervsbyggeri

Dato:

20. oktober 2000

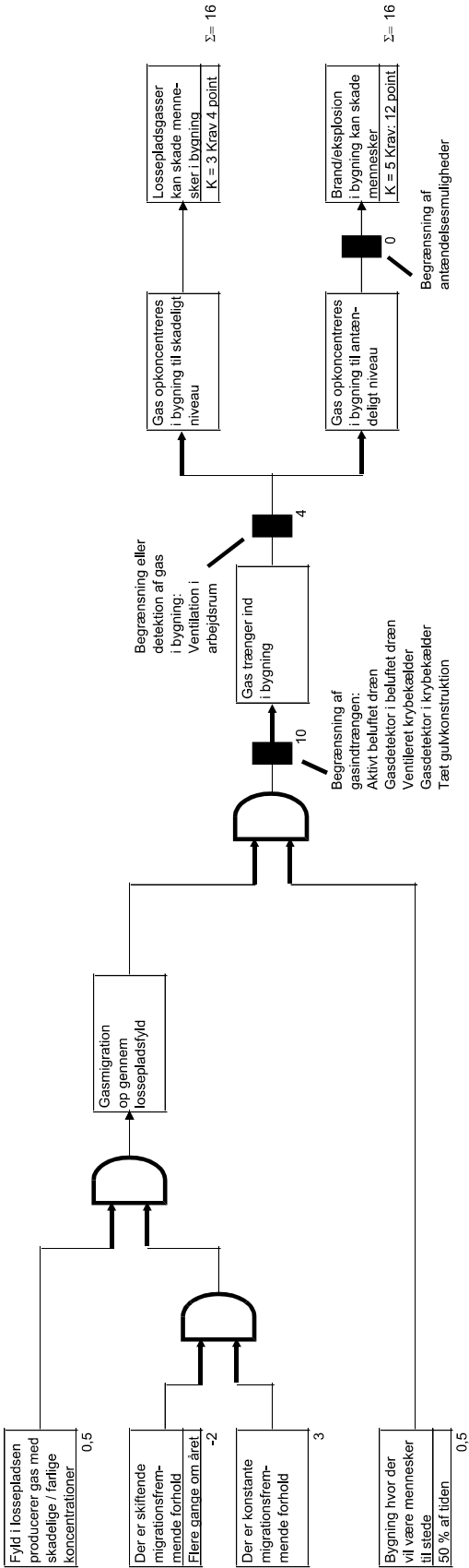
Revision nr.:

I

Udarbejdet af:

TVB, KSB

COWI



Lokale i stueplan i erhvervsbyggeri (1A)

Scenariet er et lokale i stueplan i erhvervsbyggeri på en nedlagt losseplads. Det vil sige, at der foretages en vurdering af gasindtrængen og antændelse i stueplan.

I det efterfølgende er pointtildelingen gennemgået med standard årsager, forudsætninger og barrierer anført.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig midt i fase VI og tildeles derfor 0,5 point iht. figur 3.2 og tabel 3.1 i rapportdelen.

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Bygningen ligger i et erhvervsområde, hvor jordoverfladen er asfalteret/flisebelagt. Der tildeles derfor -2 point for skiftende migrationsfremmende forhold, svarende ca. 10-15 migrationsfremmende forhold om året, se tabel 3.3 i rapportdelen.

Der er konstante migrationsfremmende forhold

Permeabiliteten i lossepladsfyldet vurderes at være god ($\approx 10^{-11}$) og tildeles derfor 0 point, se tabel 3.4 i rapportdelen.

Da dybden til grundvandsspejlet er 12 m, vil der være store gasmængder, som kan migrere. Da mængden af gas derfor ikke begrænser en evt. migration, tildeles 0 point, se tabel 3.5 i rapportdelen.

Trykket i lossepladsen er dog lavt (ca. 5 Pa), der gives 3 point for dette, se tabel 3.6 .

Samlet får denne losseplads 3 point for de konstante migrationsfremmende forhold i lossepladsfylden.

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

Der vurderes, at være personale tilstede ca. halvdelen af tiden, svarende til 0,5 point, se tabel 3.7 i rapportdelen.

Begrænsning af gasindtrængen

Under bygningen er der placeret et aktivt beluftet dræn. Dette tildeles 4 point, se tabel 3.15 i rapportdelen.

Dernæst er der placeret en gasdetektor i det beluftede dræn. Gasdetektoren giver alarm til vægter. Da der kræves en manuel indsats, som ikke er helt veldefineret, tildeles alarmen kun 1 point.

Dernæst er der en aktivt ventileret krybekælder. Dette tildeles 3 point. 4 point er normalt muligt, men da ventilationsanlægget er slukket om natten tildeles kun 3 point, se tabel 3.14 i rapportdelen.

Der er også placeret en gasdetektor i krybekælderen, men da denne er tilkoblet samme system, som den første detektor, og kræver en indsats fra de samme personer tildeles ikke yderligere point for denne.

Endelig er gulvet udført som en tæt konstruktion, med tætnede rør- og kabelgennemføringer. Der er ingen synlige revner, og gulvkonstruktionen tildeles derfor 2 point.

I alt tildeles barrieren "begrænsning af gasindtrængen" derfor $4+1+3+2 = 10$ point.

Begrænsning eller detektion af gas i bygning

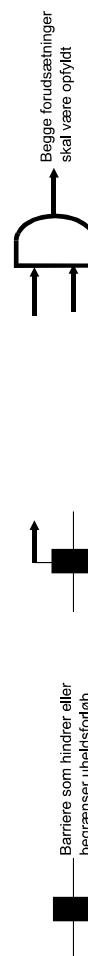
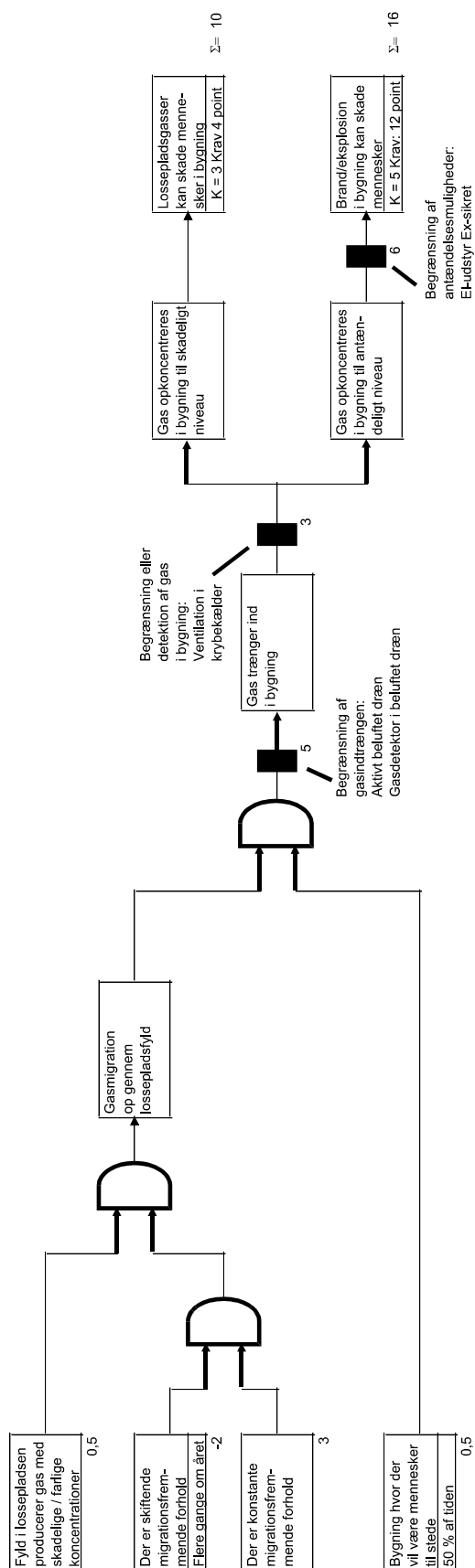
Der er ventilation af lokalerne i stueplan i bygningen. Denne tildeles derfor 4 point, se tabel 3.16 i rapportdelen.

Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der er ingen aktiv begrænsning af antændelseskilder og "barrieren" tildeles derfor 0 point. Erfaringer fra proces- og olie/gasindustri viser dog, at kun ca. hvert tiende udslip af brandbare stoffer antændes. Sidstnævnte vil svare til 2 point, men det kan være usikkert, om disse data kan overføres til almindeligt husbyggeri.

Risikovurdering

Med den simple opbygning, som disse barrierediagrammer har, skal barrierepointene blot summeres. Der opnås derfor i alt 16 point mht. konsekvensen "Brand/eksplosion kan skade mennesker". Dette er mere end de 12 point, der anbefales for at nå et sikkert niveau i bygningen. Der er således ingen væsentlig risiko.



0: Antal barrierepoint anføres her
K: Konsekvensklasse

3.3 Krybekælder under erhvervslokaler. Eksplosion skyldes elinstallationer (1B)

Scenariet er en vurdering af samme bygning, som i forrige afsnit, dog med den forskel, at der udføres en vurdering af et lokale i stueplan med den antagelse, at gas trænger ind i og antændes af el-installationer i krybekælderen under stueplan.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig midt i fase VI og tildeles derfor 0,5 point (uændret).

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Bygningen tildeles derfor -2 point for skiftende migrationsfremmende forhold som i forrige eksempel (uændret).

Der er konstante migrationsfremmende forhold

Samlet får denne losseplads 3 point for de konstante migrationsfremmende forhold i lossepladsfylden (uændret).

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

Der vurderes, at være personale tilstede ca. halvdelen af tiden, svarende til 0,5 point (uændret).

Begrænsning af gasindtrængen

Under bygningen er der placeret et aktivt beluftet dræn. Dette tildeles 4 point (uændret).

Dernæst er der placeret en gasdetektor i det beluftede dræn. Gasdetektoren giver alarm til vægter. Da der kræves en manuel indsats, som ikke er helt veldefineret, tildeles alarmen kun 1 point (uændret).

Krybekælderen tildeles ikke point her, da det er gasindtrængen til krybekælderen, som vurderes her.

I alt tildeles barrieren "begrænsning af gasindtrængen" derfor $4+1=5$ point.

Begrænsning eller detektion af gas i bygning

Krybekælderen er ventileret. Dette tildeles 3 point (uændret). 4 point er normalt muligt, men ventilationsanlægget er slukket om natten.

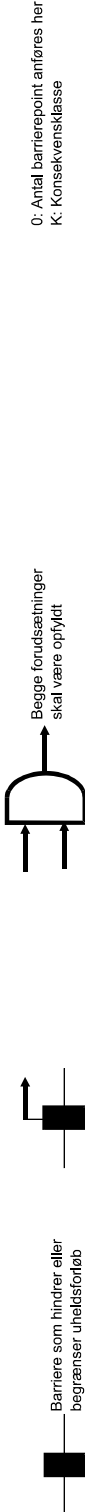
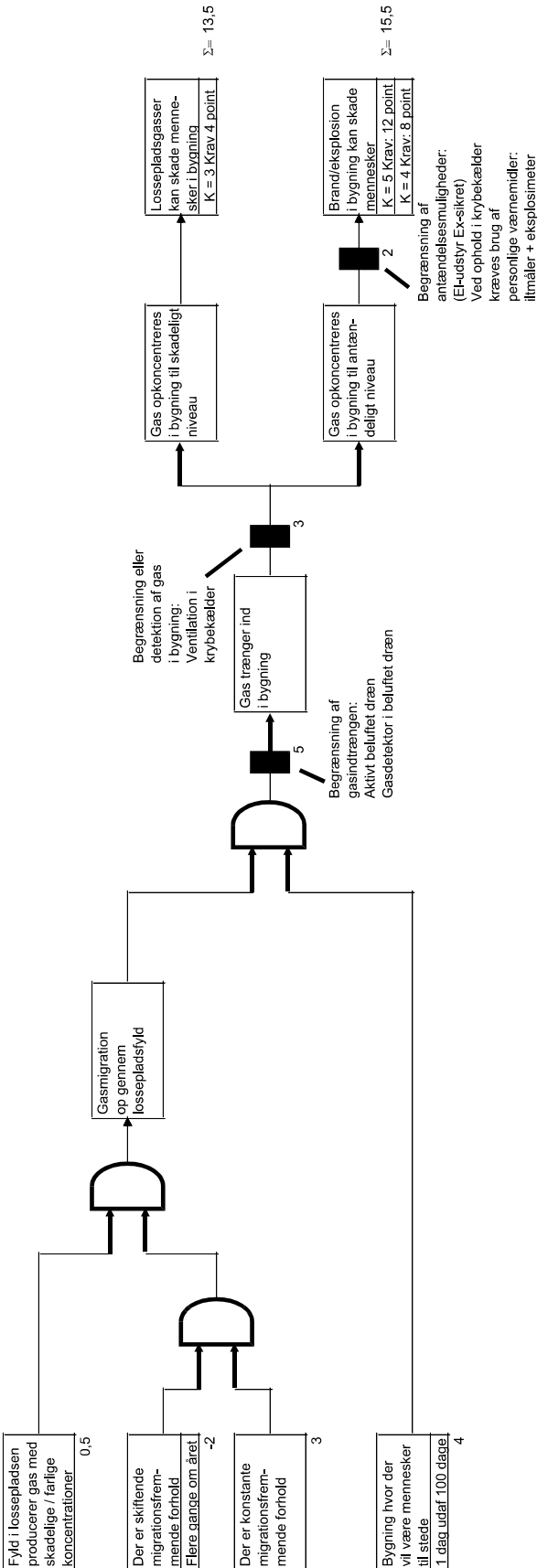
Der er også placeret en gasdetektor i krybekælderen, men da denne er tilkoblet samme system, som den første detektor, og kræver en indsats fra de samme personer tildeles ikke yderligere point for denne.

Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der er etableret ex-sikret el-udstyr i krybekælderen, denne barriere tildeles 6 point.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 16 point mht. konsekvensen "Brand/eksplosion kan skade mennesker". Dette er mere end de 12 point, der anbefales for at nå et sikkert niveau i bygningen.



3.4 Krybekælder under erhvervslokaler. Eksplosion skyldes håndværker i krybekælder (1C)

Scenariet er en vurdering af samme bygning, som i forrige to afsnit, dog med den forskel, at der udføres en vurdering af, at gas trænger ind i og antændes af en håndværker i krybekælderen under stueplan. Risikovurderingen udføres for både håndværker og personer i erhvervslokalet i stueplan.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer
(Uændret).

Der er skiftende migrationsfremmende forhold
(Uændret).

Der er konstante migrationsfremmende forhold
(Uændret).

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

I stueplan er der naturligvis stadig personale tilstede i 50 % af tiden, men da det i dette tilfælde er forudsat, at forskellige håndværkere er en medvirkende årsag til ulykken, er det deres samlede tilstedeværelse, som anvendes for tildeling af barrierepoint. Der vurderes, at være forskellige håndværkere til stede i krybekælderen ca. 1 % af tiden, svarende til 4 point.

Begrænsning af gasindtrængen
(Uændret).

Begrænsning eller detektion af gas i bygning
(Uændret).

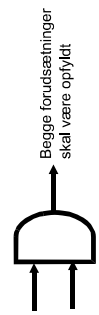
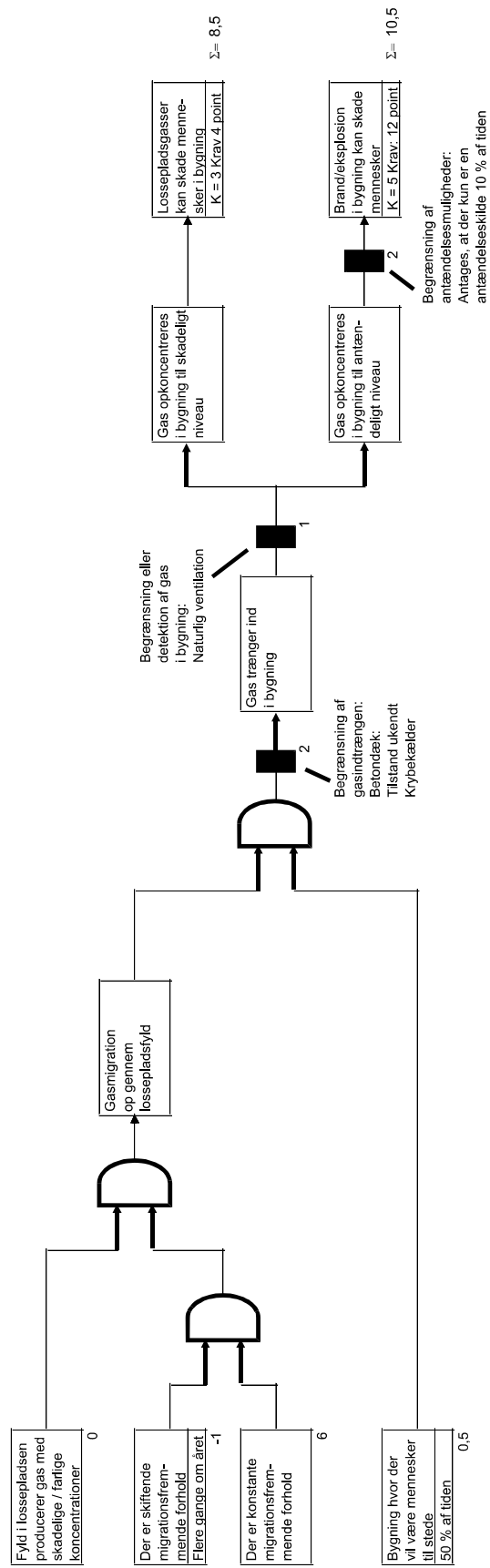
Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der er etableret ex-sikret el-udstyr i krybekælderen, denne barriere tildeles normalt 6 point. Der er desuden krav om at håndværkere skal bruge personlige værnemidler, iltmåler og eksplosiometer ved arbejde og tilsyn i krybekælderen. Det vurderes, at håndværkere i ca. hvert tiende tilfælde anvender udstyret forkert. Derfor tildeles 2 point for barrieren "begrænsning af antændelsesmuligheder", idet svigtsandsynligheden for de ex-sikrede el-installationer bliver uden betydning i denne situation, hvor håndværkerens tilstedeværelse er medvirkende årsag til ulykken.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 15,5 point mht. konsekvensen "Brand/eksplosion kan skade mennesker". Dette er mere end de 12 point, der anbefales for at nå et sikkert niveau i bygningens stueplan, hvor personalet betragtes som personer uden relation til lossepladsen, idet deres tilstedeværelse på denne arbejdsplads ikke har nogen relation til den tidligere losseplads.

For håndværkeren kan man anlægge den synsvinkel, at han har en tilknytning til lossepladsen, idet han/hun netop tilser nogle installationer, som har en funktion, der er knyttet til lossepladsen. Håndværkeren er desuden bekendt med risikoen for tilstedeværelse af lossepladsgasser. Håndværkeren betragtes derfor på lige fod med en medarbejder på lossepladsen. Der kræves derfor 8 point ($K = 4$) for en ulykke, som medfører varig skade eller dødsfald for håndværkeren. Konsekvensen "Brand/eksplosion kan skade mennesker" opnår



0: Antal barrierepoint anføres her
K: Konsekvensklasse

dog 15,5 point for såvel håndværkeren som medarbejderen i stueplan, og sikkerhedsniveauet er derfor acceptabelt.

3.5 Bolig på lille losseplads (1D)

Scenariet er en vurdering af en bolig på en lille losseplads. Lossepladsen er et lille opfyldt mosehul med en fylddybde på 3-4 meter og en permeabilitet, som vurderes som god.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig i fase V og tildeles derfor 0 point.

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Jordoverfladen omkring boligen er ikke asfalteret/flisebelagt. Der tildeles derfor -1 point for skiftende migrationsfremmende forhold, svarende ca. 3-5 migrationsfremmende forhold om året.

Der er konstante migrationsfremmende forhold

Permeabiliteten i lossepladsfyldet vurderes at være god og tildeles derfor 0 point.

Dybden til grundvandsspejlet er kun 1 m, hvilket begrænser de gasmængder som kan migrere. Da mængden af gas derfor er begrænset tildeles 3 point

Trykket i lossepladsen er lavt ($< 5\text{hPa}$), der gives 3 point for dette.

Samlet får denne losseplads 6 point for de konstante migrationsfremmende forhold i lossepladsfylden.

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

Der vurderes at være beboere tilstede ca. halvdelen af tiden, svarende til 0,5 point.

Begrænsning af gasindtrængen

Fylden under boligen har sat sig. Det vurderes, at denne sætning i fylden medfører, at der er de samme forhold som ved kapillarbrydende lag under bygningen, dvs. sprækker, som gassen kan migrere forholdsvis let igennem. Der er betongulv i boligen, men tilstanden af dette er ukendt, gulvkonstruktionen tildeles derfor 1 point mht. "begrænsning af gasindtrængen".

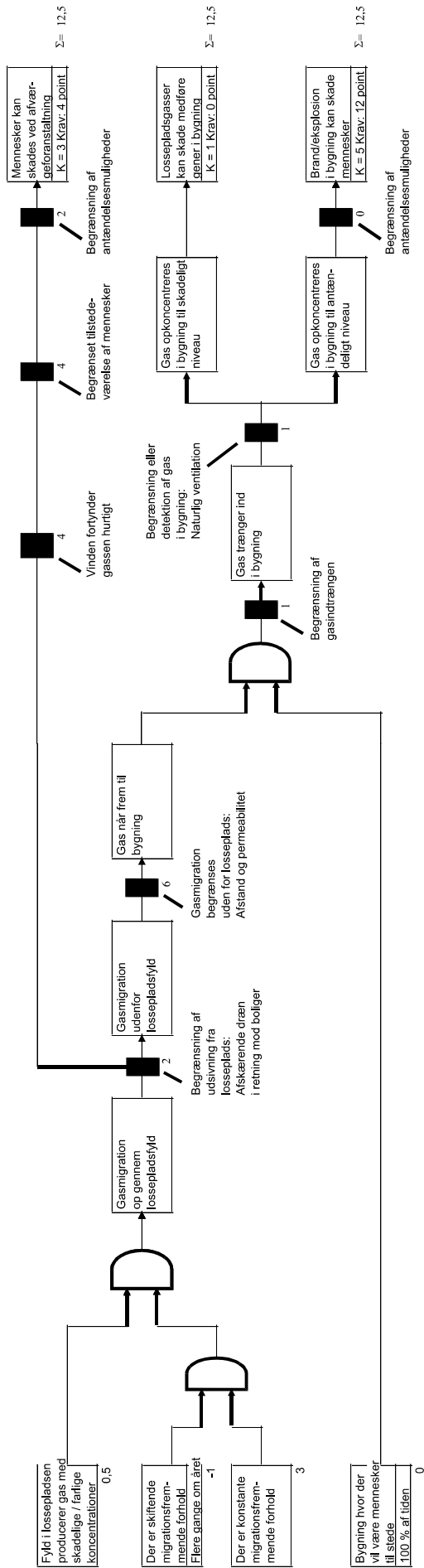
Der er krybekælder under bygningen. Krybekælderen i dette hus er udført således, at man ikke har adgang hertil, ligesom der ikke er antændelseskilder (ledninger og andet) den tildeles derfor 1 point.

Begrænsning eller detektion af gas i bygning

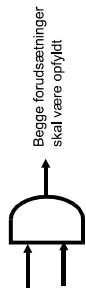
Der er kun naturlig ventilation af boligen. Denne tildeles 1 point.

Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der er ingen aktiv begrænsning af antændelseskilder og "barrieren" tildeles derfor normalt 0 point.



0: Antal barrierepoint anføres her
K: Konsekvensklasse



Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 10,5 point mht. konsekvensen ”Brand/eksplosion kan skade mennesker”. Dette er mindre end de 12 point, der anbefales for at nå et sikkert niveau i boligen.

Det anbefales derfor, at boligen sikres yderligere mod gaseksplosionsrisikoen, f.eks. ved etablering af et beluftet dræn under boligen, dette vil kunne tildeles 2-3 point afhængig af udførelsen af drænet, se tabel 3.13 i rapportdelen.

3.6 Boligblok placeret uden for stor losseplads (2A)

Dette scenarie beskriver en risikovurdering af en boligblok placeret 20 meter fra en stor losseplads. Lossepladsen er den samme, som er risikovurderet i eksempel 1A til 1C. I dette afsnit foretages risikovurderingen blot for en bolig, der ligger uden for lossepladsfylden.

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Jordoverfladen er asfalteret/flisebelagt. Da der er etableret trykaflastning af overdækkede arealer betragtes denne dog som en åben overflade. Der tildeles derfor -1 point for skiftende migrationsfremmende forhold, svarende ca. 20-30 migrationsfremmende forhold om året.

Der er konstante migrationsfremmende forhold

(Uændret i forhold til 1A).

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig midt i fase VI og tildeles derfor 0,5 point (uændret).

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

Der vurderes, at være personale tilstede altid, da det er en boligblok, hvor forskellige beboere kan have dag/nat arbejde eller være hjemme pga. pension o.lign. Dette svarer til 0 point.

Begrænsning af udsivning fra losseplads

Der er etableret et afværgedræn langs lossepladsens periferi. Afværgedrænet vil have en begrænsende virkning på den gasmængde, som vil migrere mod bygninger udenfor fylden. Afværgedrænet tildeles derfor 2 point som barrieren ”begrænsning af udsivning fra losseplads”, se tabel 3.8 i rapportdelen.

Gasmigration begrænses udenfor losseplads

Gasmigration fra lossepladsen til bygninger udenfor denne vil begrænses af bl.a. afstanden og permeabiliteten af jorden imellem lossepladsen og bygningerne. Denne begrænsning tildeles barrierepoint efter principperne i afsnit 3.4.2 i rapportdelen.

Idet der er målt et overtryk i lossepladsen på 5 Pa og gaspermeabiliteten, k er fastsat ud fra tabel 3.2 i bilag 1 (mellemfint sand), beregnes den maksimale kontinuerlige gasmigrationsafstand ($L_{\text{stationær}}$):

$$L_{\text{stationær}} = -C \frac{k}{11 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{p}{0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}} \right) \cdot 3600 = -0,5 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-11}}{11 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{5}{0,05} \cdot 3600 \text{ s/h} = 0,8 \text{ m}$$

Den maksimale varierende gasmigrationsafstand fastsættes iht. tabel 3.10 i rapportdelen til $L_{\text{varierende}} = 8 \text{ m}$.

Dvs:

$$L_{\text{max}} = 9 \text{ m}$$

Afstanden til boligblokken er som ovenfor nævnt 20 m. Da denne afstand er større end 2 gange L_{max} , gives der 6 point for selve afstanden, jf. tabel 3.12 i rapportdelen.

Begrænsning af gasindtrængen

Huset har støbt gulv, men standen virker dårlig og der tildeles derfor kun 1 point.

Begrænsning eller detektion af gas i bygning

Der er ingen detektion eller egentlig ventilering i bygning. Naturlig ventilation tildeles 1 point.

Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der er ingen begrænsninger af antændelseskilder i kælderen, der er muligvis også vaskekælder o.lign., som betyder, at der er næsten konstant tilstedeværelse af antændelseskilder.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 12,5 point mht. konsekvensen "Brand/eksplosion kan skade mennesker". Dette er mere end de 12 point, der anbefales for at nå et sikkert niveau i bygningen.

Hvis sikkerhedsniveauet ikke havde været tilstrækkeligt, kunne man f.eks. koble bygningens eksisterende ventilationsanlæg til kælderen for at opnå et bedre sikkerhedsniveau i bygningen. Bedre undersøgelser af gulvkonstruktionen kunne måske også betyde, at man tildelte barrieren "gasindtrængen begrænses" flere point.

Når man indfører en sikkerhedsforanstaltning, bør man overveje, om denne kan give anledning til nye uønskede risici. Afværgeforanstaltninger, som skal aflaste lossepladsens overtryk, vil give anledning til udledning af lossepladsgasser, som evt. kan skade folk, hvis afkastet fra aflastningen er placeret uhensigtsmæssigt.

I den øverste gren på barrierediagram 2A, er der foretaget en vurdering af placeringen af afkastet fra denne losseplads. Afkastet er placeret forholdsvis utilgængeligt for uvedkommende i 3 meters højde. Effekten af placering, fortynding af vind og manglende antændelseskilder er vurderet, og den anførte konsekvens (formentlig lille flamme ved afkaståbningen) opnår således 12,5 point - en rigelig god margin til de 4 point, som kræves.

3.7 Bolig placeret uden for stor losseplads (2B)

Dette scenarie beskriver en risikovurdering af den bolig i Skellingsted, hvor der i 1991 opstod brand/eksplosion pga. lossepladsgasser. Ulykken er nærmere beskrevet i bilag 5. Boligen var placeret 20 meter fra en stor losseplads.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig i fase IV og tildeles derfor 0 point.

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Jordoverfladen omkring boligen var ikke asfalteret/flisebelagt. Der tildeles derfor -1 point for skiftende migrationsfremmende forhold, svarende ca. 10-15 migrationsfremmende forhold om året.

Der er konstante migrationsfremmende forhold

Permeabiliteten i lossepladsfyldet vurderes at være god og tildeles derfor 0 point.

Da dybden til grundvandsspejlet er 16 m, hvilket er over 10 m, vil der være store gasmængder, som kan migrere. Da mængden af gas derfor ikke begrænser en evt. migration tildeles 0 point.

Trykket i lossepladsen er højt pga. slutfodækning af lossepladsen, der gives 0 point for dette.

Samlet får denne losseplads 0 point for de konstante migrationsfremmende forhold i lossepladsfylden. Dette svarer til, at gassen vil kunne migrere i lossepladsfylden hver gang, de skiftende migrationsfremmende forhold giver anledning hertil.

Bygning hvor der vil være mennesker til stede

Det vurderes, at der vil være beboere tilstede ca. halvdelen af tiden. Dette svarer til 0,5 point.

Begrænsning af udsivning fra losseplads

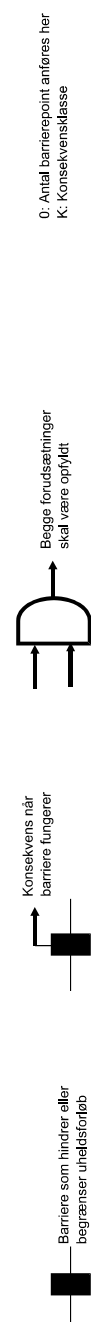
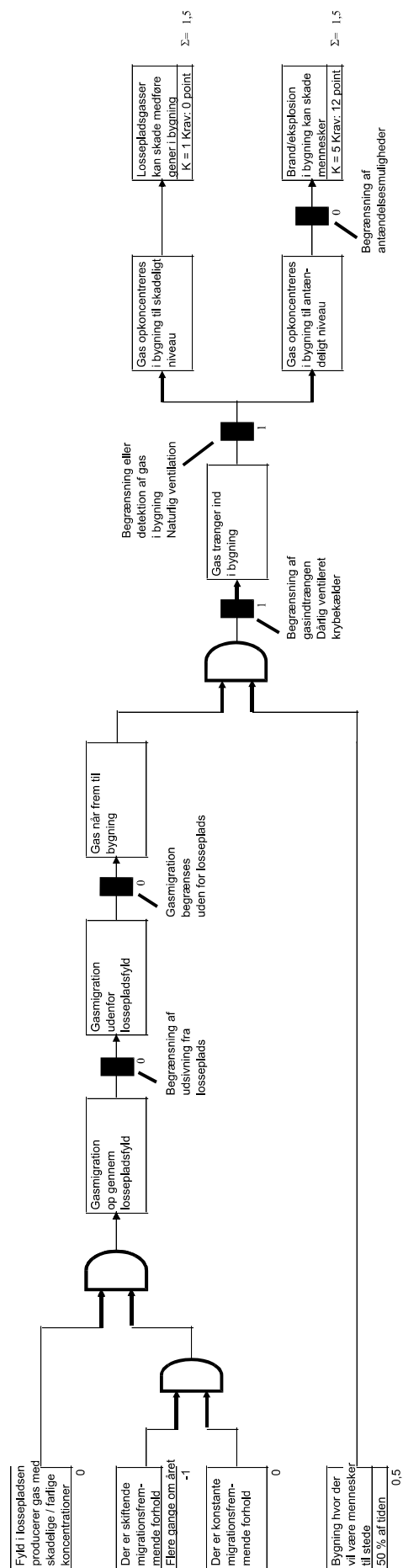
Ingen - 0 point. Slutfodækningen er udført således, at den øger trykket i fylden, men ikke afspærrer migrationsvejen mod denne bolig.

Gasmigration begrænses udenfor losseplads

Gasmigration fra lossepladsen til bygninger udenfor denne vil begrænses af bl.a. afstanden og permeabiliteten af jorden imellem lossepladsen og bygningerne. Denne begrænsning tildeles barrierepoint efter principperne i afsnit 3.4.2 i rapportdelen.

Idet der er målt et overtryk i lossepladsen på 1000 Pa og gaspermeabiliteten, k er fastsat udfra tabel 3.2 i bilag 1 (groft sand), beregnes den maksimale stationære gasmigrationsafstand:

$$L_{\text{Stationær}} = -C \frac{k}{11 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{\Delta p}{0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}} \right) \cdot 3600 = -0,5 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-11}}{11 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1000}{0,05} \cdot 3600 \text{ s/h} = 65 \text{ m}$$



Da fyldhøjden i lossepladsen er 16 m og gaspermeabiliteten er $2 \cdot 10^{-11} > 10^{-12}$ skal den stationære gasmigrationsafstand iht. tabel 3.10 i rapportdelen nedsættes til 90 % af den ovenfor beregnede værdi:

$$L_{\text{Stationær}} = 0,9 \cdot 65 = 59 \text{ m}$$

Den maksimale varierende gasmigrationsafstand fastsættes iht. tabel 3.11 i rapportdelen til $L_{\text{varierende}} = 8 \text{ m}$.

Dvs:

$$L_{\text{max}} = 67 \text{ m}$$

Afstanden til huset er som ovenfor nævnt 20 m. Da denne afstand er mindre end $\frac{1}{2}L_{\text{max}}$, gives der 0 point for barrieren ”begrænsning af gasudbredelse” pga. afstanden, jf. tabel 3.12 i rapportdelen.

Begrænsning af gasindtrængen

Huset var udført med et trægulv ovenpå stampet jord. Dette tildeles ingen barrierepoint.

Der var en dårlig ventileret krybekælder under huset, krybekælderen er tildelt 1 barrierepoint.

Grundvandsstanden er også over 10 m under huset og begrænser derfor ikke gasindtrængen.

Begrænsning eller detektion af gas i bygning

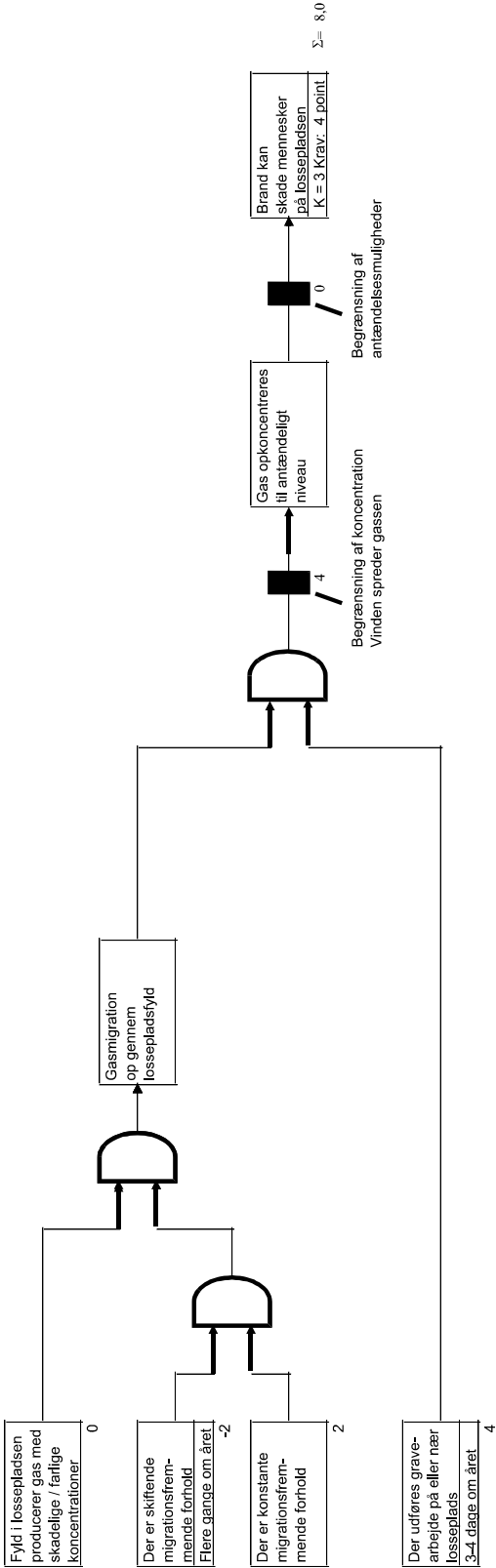
Der er ingen detektion eller egentlig ventilering i bygning. Naturlig ventilation tildeles 1 point.

Begrænsning af antændelsesmuligheder

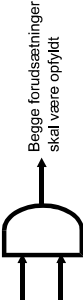
Der var ingen begrænsninger af antændelseskilder, og beboerne var rygere, så der tildeles ingen point for ”begrænsning af antændelsesmuligheder”.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt kun 1,5 point mht. konsekvensen ”Brand/eksplosion kan skade mennesker”. Dette er betydelig mindre end de 12 point, der anbefales for at nå et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau i huset.



0: Antal barrierepoint anføres her
K: Konsekvensklasse



Konsekvens når
barriere fungerer

Barriere som hindrer eller
begrænser uheldsforløb

Begge forudsætninger
skal være opfyldt

3.8 Gravearbejde på losseplads (3A)

Dette scenarie beskriver en risikovurdering af et vilkårligt gravearbejde på en nedlagt losseplads. Med et vilkårligt gravearbejde menes, at der f.eks. etableres en ny gasledning eller kloak henover lossepladsen. Gravearbejde pga. flytning af affald er ikke vurderet.

Fyld i lossepladsen producerer gas med skadelige/farlige koncentrationer

Lossepladsen vurderes til at befinde sig i fase IV og tildeles derfor 0 point.

Der er skiftende migrationsfremmende forhold

Det antages, at lossepladsen er slutaftdækket. Ved gravearbejde vil slutaftdækningen gennembrydes og lossepladsgassen vil lettest kunne trænge ud af lossepladsen der hvor slutaftdækningen er gennembrudt. Der tildeles derfor – 2 point for skiftende migrationsfremmende forhold, svarende ca. 10-15 migrationsfremmende forhold om året.

Der er konstante migrationsfremmende forhold

Permeabiliteten i lossepladsfyldet vurderes at være god og tildeles derfor 0 point.

Dybden til grundvandsspejlet er 2-5 m. Da mængden af gas derfor er begrænset i en vis udstrækning tildeles 1 point Trykket i lossepladsen er moderat (>100 Pa), der gives 1 point for dette.

Samlet får denne losseplads 2 point for de konstante migrationsfremmende forhold i lossepladsfylden.

Mennesker til stede

Det vurderes, at der udføres gravearbejde af forskellige entreprenører i alt ca. 1 % af tiden. Dette svarer til 4 point.

Begrænsning af koncentration

Udsivningsrater fra lossepladsen vil være forholdsvis små. Vinden vil derfor i de fleste tilfælde fortynde lossepladsen meget hurtigt. Det vurderes at det i nogle få procent af tiden vil være så vindstille, at gassen ikke fortyndes umiddelbart. Der tildeles derfor 4 point for fortyndingseffekten.

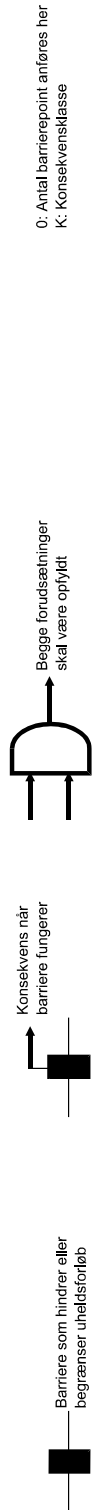
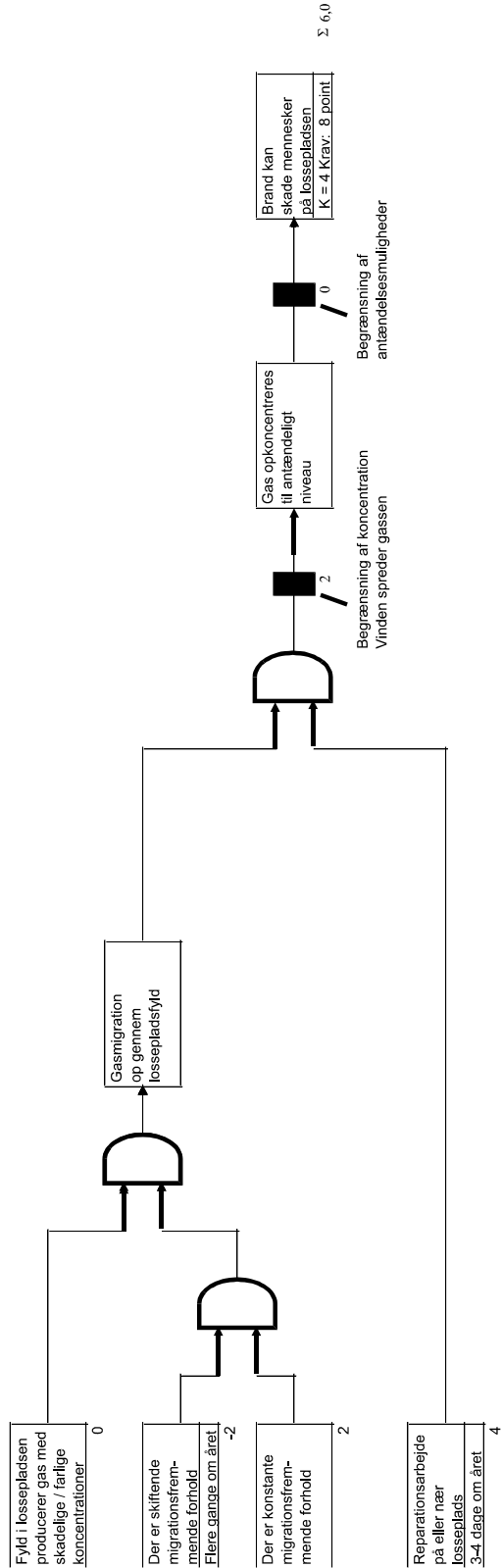
Begrænsning af antændelsesmuligheder

Der var ingen begrænsninger af antændelseskilder og udslippet vil højst sandsynligt blive antændt af gravkoen. Der tildeles derfor ingen point for ”begrænsning af antændelsesmuligheder”.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 8 point mht. konsekvensen ”Brand kan skade mennesker”. Konsekvensen er vurderet til at være i klasse 3, som svarer til mindre alvorlige personskader. For denne konsekvensklasse anbefales 4 point. Der er således et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau ved gravearbejde på lossepladsen.

For en igangværende losseplads vil gravearbejde forekomme hyppigere, til gengæld vil pladsen ikke være slutaftdækket, så hyppigheden af skiftende migrationsfremmende forhold (årsag 1) vil være mindre, i det lossepladsgassen lettere vil kunne trænge op af fylden over et større område og dermed i ubetydelige mængder.



3.9 Reparationsarbejde i brønd på losseplads (3B)

Dette scenarie beskriver en risikovurdering af et reparationsarbejde i en brønd på en losseplads.

I dette scenarie er alle udgangshændelser og barrierer vurderet som i forrige eksempel, bortset fra følgende barriere:

Begrænsning af koncentration

Udsivningsrater fra lossepladsen vil være forholdsvis små. Pga. udsivning til en (delvist) lukket brønd vil fortyndingseffekten pga. vind være begrænset og der tildeles kun 2 point for denne begrænsning.

Risikovurdering

Der opnås derfor i alt 6 point mht. konsekvensen ”Brand kan skade mennesker”. Konsekvensen er vurderet til at være i klasse 4, som svarer til varige personskader evt. dødsfald blandt medarbejdere på lossepladsen. For denne konsekvensklasse anbefales 8 point. Der er således ikke et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau ved reparationsarbejde på lossepladsen og det bør derfor anbefales at der indføres personlige værnemidler ved arbejde i lukkede eller delvist lukkede bygværker på lossepladsen. Personlige værnemidler kan omfatte ilt-måler og eksplosiometer samt. f.eks. brug af ex-sikret værktøj, se tabel 3.15 i rapportdelen.

4 Referencer

- /1/ Miljøstyrelsen: Miljøprojekt Nr. 112; Kvantitative og kvalitative kriterier for risikoaccept, 1989.
- /2/ Loss Prevention in the process industries. Second edition. Frank P. Lees, Butterworth 1996.

1 Indledning

1.1 Formål

Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S og Forskningscenter Risø har i efteråret 1995 for Miljøstyrelsen gennemført et forprojekt vedrørende risikovurdering ved gaslossepladser. Projektet er publiceret i august 1998.

Formålet med projektet var at belyse mulighederne for at udarbejde et risikokoncept for bebyggelse på eller ved gasdannende lossepladser. I forprojektet blev der især fokuseret på gaseksplodingsrisikoen. Arbejdet var opdelt i 2 faser, hvor fase 1 var forprojektet, som skulle klarlægge, om et risikovurderingskoncept kunne udarbejdes.

Nærværende bilag er et resume af forprojektet.

1.2 Baggrund

Forprojektet blev udarbejdet som en følge af dels en gaseksplodingsulykke i 1991, dels som følge af, at der blev gennemført en række undersøgelser på nedlagte lossepladser, hvor der var bebyggelse enten på eller i umiddelbar nærhed af lossepladsen.

I Danmark eksisterer der ikke grænseværdier for hvor stort et indhold der må være af methan i poreluft og indeklime. For kuldioxid findes der kun grænseværdier for, hvor meget der må være i indeluften.

De risikovurderinger, der var gennemført i relation til de foretagne gasundersøgelser, var derfor gennemført efter forskellige koncepter. Vurderingerne omkring risiciene byggede på en række skøn, og vurderingerne var ofte konservative.

2 Gaseksplosionsulykker

Der blev foretaget en beskrivelse af 4 udvalgte gaseksplosionsulykker, der alle var vurderet at være velbeskrevet.

For ulykkerne var sammenstillet oplysninger om følgende parametre, der vurderedes at være af afgørende betydning for, at ulykkerne skete:

- Lossepladsens alder
- Affaldstype
- Dæklagets beskaffenhed
- Vejrlige forhold

Hovedkonklusionerne fra de foretagne gennemgange af ulykkerne viste, at migration af lossepladsgas ind i bygninger var en reel fare, gasmigration over større afstande (op til flere hundrede meter) var observeret samt, at den underjordiske migration afhang af en lang række forhold. Disse forhold var bl.a. permeabiliteten i jorden nær lossepladsen samt dæklagets beskaffenhed, menneskeskabte migrationsveje som f.eks. skakter/dræn/kloaker/grøfter, ændringer i atmosfæretryk og lukket jordoverflade (regn/frost/smeltevand).

3 Gaslossepladser i Danmark, status

Der blev foretaget en gennemgang af gennemførte undersøgelser og risikovurderinger på danske gaslossepladser. Gennemgangen viste, at der i 1995 blev skønnet, at der var knapt 400 lossepladser med en potentiel risiko i relation til lossepladsgas. Disse skøn var dels udarbejdet på baggrund af oplysningerne vedrørende lossepladsens størrelse, alder, afdækning, afstand til bebyggelse m.v., dels udarbejdet på baggrund af en kvalitativ vurdering af de enkelte sager.

Gennemgangen viste, at der på ca. 1/3 af de ca. 80 lossepladser, hvor der var gennemført undersøgelser, var vurderet at lossepladsgassen udgjorde en risiko for bebyggelsen.

Begrundelserne for, at der var vurderet at være en risiko, var typisk forhøjede værdier af både methan (10 - 80 %) og kuldioxid (10 – 40 %) i poreluften. Endelig var der i en række tilfælde tillige målt indhold af methan i bygninger på op til 1,0 % og op til 0,6 % kuldioxid. På ca. 50 af de undersøgte lossepladser udførtes der monitoring mindst én gang pr. år, heraf mindst 2 gange pr. år på ca. 25 lossepladser.

Der var etableret afværgeforanstaltninger på ca. 15 lossepladser i form af passiv eller aktiv ventilering samt byggetekniske foranstaltninger og afgravning.

Da der stadig resterede et antal lossepladser, der ikke var undersøgt (1995), blev det vurderet, at der var behov for udarbejdelse af et risikovurderingskoncept.

4 Udlandet

Med henblik på at undersøge hvilke grænseværdier der blev benyttet for lossepladsgas og efter hvilke retningslinjer, der blev foretaget risikovurderinger for i udlandet, blev der gennemført et litteraturstudie, hvor der særligt blev lagt vægt på England, Canada og USA.

Der blev foretaget en sammenstilling af de vejledende grænseværdier for methan- og kuldioxidkoncentrationer i poreluft og indeklima, se tabel 1.

Tabel 1 Vejledende udenlandske grænseværdier

	Poreluft		Indeklima	
	Methan	Kuldioxid	Methan	Kuldioxid
England	< 1,0 % i sikkerhedszone 250 m eller kontrolsystemets rækkevidde	< 1,5 % i sikkerhedszone 250 m eller kontrolsystemets rækkevidde	< 0,25% (5 % LEL) Hvis 0,25 - 1 %: Bygninger udluftes og gaskilde identificeres. Antændelses kilder fjernes. Hvis > 1%: Bygning evakueres	< 0,5 % Hvis 0,5 - 1,5 %: Bygning udluftes og gaskilde identificeres. Antændelses kilder fjernes. Hvis < 1,5 %: Bygning evakueres
Canada	< 1 % Hvis > 5 %: Potentiel risiko	- -	< 50 ppm (baggrunds niveau) Hvis > 50 ppm: Moniteres og der udarbejdes procedure for udluftning. Hvis 0,5 %: Bygning evakueres	- -
USA	< 5,5 % Udenfor losseplads	-	< 1,25 % i facilitetsbygninger tilhørende lossepladsen	-
Danmark	-	-	- < 0,25 % ved arbejde med åben ild	< 0,5 % Dog benyttes 0,1 % ofte som komfortværdi

∴ Ikke opstillet

De opstillede grænseværdier for poreluft blev vurderet umiddelbart at være lave.

Det fremgik ikke, hvorledes grænseværdierne var fastlagt, men det blev skønnet, at "forsigtighedsprincippet" var anvendt.

Der blev ikke fundet litteratur med retningslinjer for udarbejdelse af risikovurderinger.

5 Risikovurdering

Det er anført, at det var svært at vurdere, om de risikovurderinger der gennemførtes i Danmark var meget konservative. Der var en generel tendens til stor forsigtighed i vurderingerne på grund af usikkerheden omkring vurderingen af risikoens størrelse samt konsekvenserne af en eksplosion.

5.1 Gasdannelse

Det er overordnet blevet beskrevet, hvorledes gasdannelsen sker i en losseplads.

De faser en losseplads gennemgik, tidshorisonter for omdannelsen, gasdannelsespotentialer og gasproduktionsrater er blevet beskrevet.

De faktorer, der har betydning for gasdannelsen, afhang bl.a. af:

- pH og alkalinitet
- Vandindhold
- Temperatur
- Næringsstoffer
- Sulfatindhold
- Homogenitet og densitet af affald
- Inhibitorer
- Lossepladsens drift og opbygning.

5.2 Gasspredning

Den producerede lossepladsgas spredtes til omgivelserne ved enten diffusion eller konvektion. Den diffusive spredning skete på grund af koncentrationsforskelle og ville oftest være betydelig langsommere end den konvektive spredning.

De mest betydende parametre ved konvektiv spredning var trykforskelle samt jordens permeabilitet. Faktorer, der var af afgørende betydning for gasspredningen var:

- Gastrykket i lossepladsen
- Gassammensætningen
- Geologien samt afdækningslagets beskaffenhed
- Menneskeskabte strømningsveje
- Meteorologiske forhold
- Andre forhold som fortynding, sorption, methanoxidation m.m.

Gastrykket afhang af lossepladsens størrelse samt, hvor let gassen kunne slippe væk. I Danmark var der ved de gennemførte undersøgelser kun registreret begrænsede overtryk, 2 - 100 Pa (0,02 - 1 mbar).

Menneskeskabte strømningsveje, som for eksempel utætte kloakker og rørføringer samt gruskastningen omkring disse i jorden ved lossepladsen, kunne bidrage til en større horisontal gasspredning.

En af de vigtigste faktorer i relation til gasspredningen var ændringer i atmosfæretrykket. Et kraftigt trykfald over relativt kort tid ville medføre en voldsom stigning i trykforskellen mellem lossepladsen og omgivelserne. Dette ville medføre en kraftig stigning i gasspredningen til omgivelserne. Såfremt den vertikale transport ud af pladsen var nedsat (for eksempel frost), ville det medføre mulighed for en større horisontal gastransport.

Vandindholdet i jorden influerede på dels jordens gaspermeabilitet og dels på diffusiviteten. Dette betød, at nedbørsmængden havde en effekt på migrationen på både langt og kort sigt.

På kort sigt kunne store mængder nedbør føre til vandmætning i de øvre jordlag, og dette hindrede en vertikal gasmigration. Dette var bekræftet af canadiske undersøgelser. Andre meteorologiske forhold som f.eks. sne, islag og frost havde også betydning for permeabiliteten i jorden, og disse faktorer var ofte længerevarende sammenlignet med jordens vandindhold.

Endelig havde også vindhastighed og temperatur indflydelse på udvekslingen af gas i de øverste cm af jordlagene.

Der var kun få undersøgelser, der beskrev gasspredning som følge af tidsmæssige variationer. I England var der observeret gas i afstande op til flere hundrede m fra en losseplads. Dette blev vurderet at være usandsynligt i Danmark på grund af den forholdsvis ringe dybde af den umættede zone. I Skellingsted var der således målt op til 5 % methan i en afstand af ca. 50 m fra lossepladsen.

Som grundlag for vurdering af gasspredningen var der i Danmark typisk gennemført 3 - 6 målerunder under forskellige meteorologiske forhold. Kontinuerte gasmålinger under f.eks. lavtrykspassager gav dog et bedre grundlag for gennemførelse af risikovurderingen.

Det var anført, at det som følge af kompleksiteten ved vurdering af de enkelte faktorer betydning for gasspredningen, ikke blev anset for anbefalelsesværdigt at anvende modelberegninger til vurdering af gasspredningen.

5.3 Gasindtrængen

Erfaringsmæssigt var det vanskeligt at vurdere risikoen for gasindtrængen, bl.a. fordi der kun forelå meget få undersøgelser, der belyste, hvilke veje gassen kunne transporteres ind i bygninger. Der forelå heller ikke undersøgelser af gasindtrængningsrater for lossepladsgas.

Problemstillingen var i stedet forsøgt belyst ud fra data fra indtrængen af radon i huse, da datagrundlaget her var relativt stort. Dette blev gjort, da det var antaget, at indtrængen af radon og lossepladsgas generelt blev styret af de samme mekanismer.

Transporten fra jord til hus gennem den intakte del af et betongulvet ville være diffusiv, mens transporten gennem revnedannelser ville være konvektiv.

Den konvektive transport blev styret af:

- Indendørs/udendørs trykforskelle
- Ændringer i atmosfæretrykket
- Trykforskelle mellem hus og gasreservoir
- Andre drivkræfter.

De indendørs/udendørs trykforskelle blev styret af forskelle i indendørs og udendørs temperatur, vind og drift af mekaniske ventilationsanlæg. Der kunne opstå en lille trykforskel (størrelsesorden 3 Pa) mellem husets indre og atmosfæren, der kunne give anledning til, at frisk luft via husets nærfelt blev suget ind i huset gennem revner og sprækker. Denne drivkraft varierede gennem døgnet (normalt maksima tidligt om morgenen) og gennem året (normalt med maksima om vinteren). Typiske værdier for indtrængningsraten i enfamiliehuse som følge af denne trykforskel var $0,1 - 1 \text{ m}^3/\text{time}$.

Ændringer i atmosfæretrykket medførte indtrængen af jordgas, men det var ikke særlig godt belyst hvor stor gasindtrængen et givet trykfald for et givet hus kunne resultere i.

På grund af gasdannelsen i lossepladsen ville der opstå overtryk i forhold til omgivelserne, og den trykforskel, der herved opstod mellem hus og gasreservoir, blev anset for at være en vigtig drivkraft ved selve gasspredningen.

Af øvrige drivkræfter var nævnt varmetab gennem jord fra kældervægge og vindinducerede trykfelter.

De vigtigste steder for trykdreven indtrængen af jordgas var støbeskel mellem gulvkonstruktion og væg (typisk 1 – 3 mm) og andre revner og sprækker i huset som f.eks. rørgennemføringer.

Et hus samlede luftskifte bestod af den del, der kom fra udeluften, og den del, der kom fra jorden under huset. Blandingsforholdet mellem de to bidrag var sammen med jordgassens indhold af methan bestemmende for koncentrationen af methan i indeluften.

Der blev på baggrund af målinger på Risø i testkamre beregnet, at der var en indtrængen af jordgas i almindelige enfamiliehuse ved 3 Pa svarende til $0,45 - 1,6 \text{ m}^3/\text{time}$ svarende til 0,3 – 1 % af den samlede udelufttilførsel. I en dansk undersøgelse af nyere enfamiliehuse var jordgasindtængen vurderet at ligge på gennemsnitlig $0,2 \text{ m}^3/\text{time}$.

5.4 Betingelser for gasekspllosion

Spredningsvejene for gas ind i et hus var følgende:

1. Spredning via kælder fra en ensartet emission fra jorden. Spredningen var påvirket af konvektion af bl.a. den indtrængende gas, fri konvektion, luftstrømme i lokalet og molekyler diffusion.
2. Jet-injektion af gas fra revner, forseglinger og åbne døre i rummet.

3. Spredning gennem et hus med ventilations- og konvektionsstrømme fra ét rum til det næste gennem åbninger.
4. Via rør eller hulrum for kabler.

For lossepladsgas var den primære interesse at undgå gasekspllosion. Det centrale var derfor, at koncentrationen af methan til enhver tid var under det kritiske niveau.. Det var usikkert, hvor meget gas, der skulle til for at skabe en eksplosion, idet det ikke forventedes, at den gennemsnitlige gaskoncentration i noget rum kunne overstige den nedre eksplosionsgrænse.

Det blev vurderet, at det ikke var nødvendigt at tage hensyn til pkt. 3 og 4, da pkt. 1 og 2 allerede udgjorde en eksplosionsrisiko.

For så vidt angik pkt. 1, var det anført, at det ville være muligt at relatere en ventilationshastighed til koncentrationsfordelingen i rummet baseret på data for spredning af gas i rum.

I relation til pkt. 2 kunne der anvendes matematiske udtryk for laminar og turbulente jets i luft.

6 Risikoanalytiske forhold

I forbindelse med godkendelse af industrielle anlæg udarbejdes koncepter for og krav til risikoanalyser. En risikoanalyse er en systematisk gennemgang af et anlæg, hvor der foretages identifikation af mulige farer, opstilling af scenarier, der kan føre til den identificerede fare, vurdering af scenariernes hyppighed og konsekvens samt en samlet vurdering af de herved fremkommende risici.

For lossepladser kunne dele af denne metodik anvendes. Farerne i forbindelse med lossepladser begrænsede sig dog til én type, eksplosion på grund af indtrængende gas, idet emission af methan til det fri ikke ville kunne føre til en eksplosion, men alene en overfladebrand. Vurdering af mulighederne for eksplosion i et hus i et område, hvor der forelå gasmålinger fra jorden, ville kunne foretages.

I forbindelse med vurdering og beslutningstagen var følgende model en mulighed:

Udgangspunkt: Der var foretaget målinger af tilstedeværelsen af methan.

1. Hvis målingen var $< a$, blev ingen yderligere aktiviteter foreslået
2. Hvis målingen var $> a$, blev yderligere målinger i husets indflydelseszone og under huset samt en indeklimateundersøgelse foreslået udført.
3. Hvis der blandt målingerne i poreluften var værdier $> b$ eller målingerne i indeklimaet er $> c$, blev der foreslået etableret afværgeforanstaltninger, ellers blev der ikke foreslået nogen aktion.

Fastsættelse af grænseværdierne a , b og c krævede en nøje gennemgang af tilgængelige data for indtrufne uheld samt viden om indtrængningsmekanismer fra indtrængen af radon og en længerevarende observation af en kendt losseplads, hvor disse målinger allerede var i gang.

Den samlede model skulle således omfatte:

1. Delmodel for gasdannelse ved kilden, dvs. en kvalitativ vurdering af gasdannelsen, overtryk og potentiale for gasdannelse.
2. Delmodel for horisontal transport i jord
3. Indtrængning i bygninger, dvs. indtrængningssted og -rate
4. Huskarakteristika
5. Spredning af indtrængende gas som funktion af indtrængningsrate og ventilationsforhold
6. Vurdering af koncentrationsniveauer
7. Antændelse

Gennemregning af et antal scenarier til belysning af eksplosionsproblematikken blev anbefalet foretaget.

1 Indledning

Et værktøj til risikovurdering og undersøgelse af gasproducerende lossepladser bør tage udgangspunkt i reelle risici fra gasproducerende lossepladser samt inddrage erfaringer fra nuværende undersøgelses- og risikoanalysemetoder. Med dette for øje er der derfor foretaget en dataindsamling, som omfatter rapporterede tilfælde af hændelser forårsaget af lossepladsgas (bl.a. omfattende eksplosionsulykker, brande og gasindsivning), eksisterende undersøgelsesmetodikker for lossepladsgasundersøgelser, samt erfaringer fra gængse metoder til risikovurdering.

Dette bilag sigter på at beskrive, hvorledes data er indsamlet samt på at opsummere og vurdere det indsamlede materiale, således at eventuelle hovedtendenser beskrives.

Det indsamlede datamateriale er baseret på danske såvel som udenlandske erfaringer. Der er taget udgangspunkt i den viden og de kilder, som er givet i forprojektet fra 1995, /2/, og suppleret med indsamling af data fra den efterfølgende tidsperiode. Blandt det indhentede materiale fra udlandet er kun det, som har relevans for danske forhold, anvendt ved udarbejdelse af retningslinjerne for risikovurdering.

Data på hændelser forårsaget af lossepladsgas er analyseret, og de identificerede risikoscenarier er anvendt til opstilling af barrierediagrammer. En samlet oversigt over både danske og udenlandske lossepladsgashændelser med en kort beskrivelse af hændelsen findes i afsnit 2.2.

Indsamlede oplysninger om undersøgelsesmetodikker og fremgangsmetoder for risikoanalyser er vurderet og relevante parametre inddraget i udarbejdelsen af retningslinjer for risikovurdering.

2 Danske erfaringer

I 1993 udarbejdede DAVID (Dansk Amtsvandingeniørforening) en oversigt over status for amternes arbejde med lossepladsgas /1/, og selvom lossepladsgas er indgået som tema i forbindelse med bl.a. et par ATV-møder, er der ikke siden 1993 foretaget en systematiseret indsamling og bearbejdning af amternes erfaring med lossepladsgas.

For at få en opdateret viden om de danske myndigheders, dvs. primært amternes, erfaringer og strategier for lossepladsgas er der indhentet oplysninger ved en direkte kontakt til de enkelte amter. Hver af de 14 amter samt Københavns og Frederiksberg Kommuner er først telefonisk kontaktet, med henblik på at få en kontaktperson. De 14 amter og 2 kommuner har derefter modtaget et brev med vedhæftede spørgeskemaer. Spørgeskemaerne, se afsnit 2.1, er udarbejdet med hjælp fra Amternes Videncenter for jordforurening, og omfatter spørgsmål omkring amternes kendskab til ulykkehændelser forårsaget af lossepladsgas samt oplysninger omkring fremgangsmetoder, standarder, bedste praksis samt retningslinjer i forbindelse med undersøgelser, risikovurderinger og afværgeforanstaltninger i relation til lossepladsgas.

2.1 Spørgeskemaer

Der er udsendt spørgeskemaer til alle 14 amter samt Københavns og Frederiksberg Kommuner. En liste over de internationale samarbejdspartnere og miljøstyrelser, som har modtaget et spørgeskema, er gengivet i tabel 2.1. I tabellen er de, der har besvaret spørgeskemaet eller sendt brev om, at de ingen oplysninger har, markeret med fed skrift. Som det fremgår af tabellen, er det kun ca. totredjedel af amterne, der har besvaret spørgeskemaerne.

Tabel 2.1 Danske miljømyndigheder som har modtaget et spørgeskema. Fed skrift markerer, at den pågældende myndighed har besvaret spørgeskemaet

Amt	Adresse	Kontakt person
Københavns Amt Teknisk Forvaltning	Stationsparken 27 2600 Glostrup	Henning Roed
Frederiksborg Amt	Kongens Vænge 2 3400 Hillerød	Steen Larsen
Roskilde Amt	Køgevej 80 Postbox 170 4000 Roskilde	Peter Rank
Vestsjællands Amt Teknisk Forvaltning	Alléen 15 4180 Sorø	Jan Huus Vestergaard
Storestrøms Amt Teknisk Forvaltning	Parkvej 37 4800 Nykøbing F	Thomas Bjerre
Bonholms Amt Teknisk Forvaltning	Østre Ringvej 1 3700 Rønne	Bent E. Nielsen

Amt	Adresse	Kontakt person
Fyns Amt Teknisk Forvaltning	Ørbækvej 100 5220 Odense SØ	Jakob S. Weber
Sønderjyllands Amt Grundvandsafdelingen	Jomfrustien 2 6270 Tønder	Inge Therkilsen
Ribe Amt Teknisk Forvaltning	Sorsigvej 35 6760 Ribe	Henrik Kikkenborg
Vejle Amt Teknisk Forvaltning	Damhaven 12 7100 Vejle	Jes Pedersen
Ringkjøbing Amt Teknisk Forvaltning	Dampstrædet 2 6950 Ringkjøbing	Ingela Karlsson
Århus Amt Afd. for forurennet jord og affald	Lyseng Allé 1 8270 Højbjerg	Erik Pedersen
Viborg Amt	Skottenborg 26 Postbox 21 8800 Viborg	Hans Fredborg
Nordjyllands Amt	Niels Bohrs Vej 30 Postbox 8300 9220 Aalborg Øst	Mette Mihle Laurbak
Københavns Kommune Miljøkontrollen	Flæsketorvet 68 1711 København V	Mariam Wahid
Frederiksberg Kommune Teknisk Forvaltning	Rådhuset 2000 Frederiksberg	Niels Kaalund

De anvendte spørgeskema er angivet i det følgende. Spørgeskemaet er opdelt i fire dele: Kendskab til gasulykker, undersøgelser, risikovurdering og afværgeforanstaltninger.

Spørgeskema om ulykker forårsaget af lossepladsgas. Ulykker i forbindelse med lossepladsgas dækker over mange forskellige ulykkestyper, spændende fra egentlig gaseksplosionsulykker (som ulykken ved Skellingsted) over mindre ulykker (hvor en lille mængde gas bliver antændt uden, at der dog sker hverken person eller materiel skade) til ulykker hvor personer har fået ildebefindende på grund af iltfortrængning eller høje kuldioxidkoncentrationer. Alle ulykkestyper, der skyldes lossepladsgas, har interesse for projektet.		
Spørgeskemaet er udfyldt af: Amt: _____ Navn: _____ Telefon nr.: _____ E-mail adresse: _____		
1 Har amtet kendskab til ulykker forårsaget af lossepladsgas, som er foregået inden for amtet? Nej: _____ Ja: (hvor mange) _____ Hvis amtet har kendskab til flere ulykker, udfyld da venligst et spørgeskema for hver ulykke.		
Nøgledata for ulykken:		
Ulykkesdato: _____	Ulykkessted: _____	Post nr. /by _____
Adresse: _____	Gaseksplosionsulykke: _____	Mindre brand: _____
Ildebefindende: _____	Andet: _____	
Kort beskrivelse af ulykken: _____		

Uddybende data for ulykken:

Har amtet kendskab til om ulykken er undersøgt/beskrevet ?

Nej: _____

Ja af Amtet: _____

Ja af Brandinspektør: _____

Ja af anden (skriv hvem): _____

Ja af grundejer: _____

Ja af Embedslæge: _____

Er lossepladsen undersøgt ?

Nej: _____

Ja gasundersøgelse: _____

Ja geoteknik: _____

Ja grundvandsundersøgelse: _____

Ja anden (hvilken): _____

Har Amtet oplysninger om:

- Meteorologiske forhold op til ulykkesdagen
(variationer i atmosfære trykket, nedbør, temperatur) Nej: _____ Ja: _____
- Geologiske og hydrogeologiske forhold på ulykkesstedet Nej: _____ Ja: _____
- Bygningens beskaffenhed før ulykken Nej: _____ Ja: _____

Evt. yderligere kommentarer kan angives her:

Spørgeskema om undersøgelser for lossepladsgas**Spørgeskemaet er udfyldt af:**

Amt: _____ Navn: _____

Telefon nr.: _____ E-mail adresse: _____

1) Har Amtet en "bedste praksis"/koncept, som anvendes ved udførelsen af gasundersøgelser?:

Nej _____ Ja _____

2) Har amtet minimumskrav til en gasundersøgelse, eller foretages en vurdering fra sag til sag.?

Minimumskrav _____ ingen minimumskrav _____ (sæt kryds)

3) Nedenstående spørgsmål bedes besvaret ud fra hvorledes de(n) sidste gasundersøgelse(r) er udført

3.1) Gasundersøgelsen er foretaget på baggrund af:	Nej	Ja	Ved ikke
Kun jordspyd #)	_____	_____	_____
Jordspyd #) og borer	_____	_____	_____
Kun borer	_____	_____	_____

#) Jordspyd dækker over prøvetagningsmetoder, hvor der ikke opnås en egentlig geologisk beskrivelse af fylden, såsom jordspyd, poreluftssonderinger og Geoprobe.

3.2) Gasundersøgelsen er foretaget på baggrund af:	Nej	Ja	Ved ikke
En gasmålerunde	_____	_____	_____
3 gasmålerunder, udført inden for ca. 1-2 måneder	_____	_____	_____
3 gasmålerunder, udført med ca. 1-månedes mellemrum	_____	_____	_____
Gasmålinger udført både sommer og vinter	_____	_____	_____
Andet: beskriv dette:			

3.3) Gasundersøgelsen har omfattet pejlinger af grundvandsstanden? _____

3.4) Gasundersøgelse har omfattet indendørsmålinger fordi gasundersøgelser altid omfatter indendørsmålinger hvis:

der er bygninger på lossepladsen:	_____	_____	_____
der er målt høje koncentrationer i jorden omkring bygningen:	_____	_____	_____
det bliver vurderet, at der er akut fare:	_____	_____	_____

3.5) Gasundersøgelse har omfattet en byggeteknisk gennemgang fordi gasundersøgelser altid omfatter byggetekniske gennemgange hvis:

der er bygninger på lossepladsen:	_____	_____	_____
der er målt høje koncentrationer i jorden omkring bygningen:	_____	_____	_____
det er i forbindelse skitseprojektering af afværgeforanstaltninger:	_____	_____	_____

Spørgeskema om risikovurdering af lossepladsgas

Spørgeskemaet er udfyldt af:

Amt: _____ Navn: _____
Telefon nr.: _____ E-mail adresse: _____

1) Har amtet udarbejdet/ fået udarbejdet et koncept for risikovurdering af lossepladsgas, som amtet anvender i forbindelse med risikovurdering af lossepladsgas ?

Nej _____ Ja _____

1.1 Hvis ja. Giv en kort beskrivelse af konceptet. Vedlæg evt. en kopi af konceptet

2) Anvender amtet Miljøstyrelsens vejledninger nr. 6 og 7, 1998 ved vurderinger af lossepladsgas ?

Nej _____ Ja _____

2.1 Hvis ja. Anvendes Miljøstyrelsens beregningsprogram JAGG ved risikovurderingen?

Nej _____ Ja _____

2.2 Hvis Ja. Hvilke værdier sættes følgende parametre til:

Opblandingshøjde: _____

Luftskifte: _____

Trykforskel over gulv: _____

3) Har amtet haft sager (og hvor mange), hvor risikovurderingen er udført efter det oven for nævnte (spørgsmål 1 eller 2) koncept for risikovurdering?

Nej _____ Ja (hvor mange) _____

Fremsend evt. kopi af risikovurdering

Spørgeskema om afværgeforanstaltninger for lossepladsgas

Spørgeskemaet er udfyldt af:

Amt: _____ Navn: _____
Telefon nr.: _____ E-mail adresse: _____

	Nej	Ja
Har Amtet udført afværgeforanstaltninger mod lossepladsgas (angiv antal sager)?	_____	_____
Er der i forbindelse med amtets afværgeforanstaltninger mod losse-pladsgas gennemført et monitoringsprogram til eftervisning af foran-staltnings effektivitet ?	_____	_____
Er det muligt at sammenfatte og bearbejde dataene fra monitoringspro-grammerne	_____	_____
Har Amtet givet tilladelse til udførelse af afværgeforanstaltninger mod lossepladsgas ?	_____	_____
Er der i forbindelse med frivillige afværgeforanstaltninger mod losse-pladsgas gennemført et monitoringsprogram til eftervisning af foran-staltnings effektivitet ?	_____	_____

2.2 Kendskab til gasulykker

Før udsendelsen af spørgeskemaerne havde arbejdsgruppen kendskab til tre ulykker i Danmark, som skyldes tilstedeværelsen af lossepladsgas, en ulykke på Amagerfælled i 1970'erne, Skellingsted ulykken i 1991 samt en ulykke i Fåborg på Fyn også i 1991. Ved udsendelsen af spørgeskemaerne var det forventningen, at der kunne indsamles oplysninger om yderligere nogle få mindre ulykker på såvel idriftværende affaldsdeponier som lukkede lossepladser.

I Ringkøbing Amt havde man kendskab til, at der på en losseplads 2 gange i løbet af 90'erne er sket uheld. Begge gange var der tale om eksplosioner i en perkolatdrænbrønd forårsaget af en ikke gnistfri el-afbryder. Omfanget af ulykkerne er ikke nærmere beskrevet. Ingen af de øvrige amter havde kendskab til gasulykker ud over de tre, som arbejdsgruppen allerede havde kendskab til.

Et enkelt amt foreslog, at arbejdstilsynet muligvis havde oplysninger om ulykker på idriftværende affaldsdeponier. Dette har dog ikke ligget inden for arbejdsgruppens muligheder.

2.3 Undersøgelsesmetodikker

Hovedparten af de amter, der har besvaret spørgeskemaet, har svaret, at de har en "bedste praksis"/koncept for undersøgelser af lossepladsgas, f.eks. i form af minimumskrav til undersøgelserne. De øvrige amter svarer, at undersøgelsernes omfang bygger på en vurdering fra sag til sag.

I forhold til de oplysninger, der fremkom ved DAVID's erfaringsopsamling i 1993 /1/, viser de besvarede spørgeskemaer, at der er sket en udvikling i de krav, som amterne stiller med hensyn til gasundersøgelsesernes omfang og metodik. I starten af 1990'erne blev mange gasundersøgelser udført med poreluftsmålinger udelukkende ved jordspyd, medens amternes svar viser, at i dag udføres undersøgelserne ved en kombination af målinger i jordspyd og filtersatte boringer, eller udelukkende med poreluftsmålinger fra filtersatte boringer. Tidligere blev undersøgelsesresultaterne vurderet på baggrund af en enkelt eller to målinger i hvert målepunkt, medens hovedparten af amterne svarer, at de i dag foretager 3 eller flere målerunder, og enkelte amter anvender som udgangspunkt også kontinuerte målinger af 4 til 7 dages varighed i udvalgte målepunkter.

Med hensyn til at anvende indendørsmålinger er der stadig stor forskel på den praksis, der er i de forskellige amter. Enkelte amter anvender i vid udstrækning indendørsmålinger i forbindelse med vurderingen af lossepladsgas, medens andre amter sjældent eller aldrig anvender indendørsmålinger. I forhold til starten af 1990'erne er anvendelsen af indendørsmålinger blevet mere målrettet, og hovedparten af amterne, der anvender indendørsmålinger, foretager også en byggeteknisk gennemgang af bygningen.

2.4 Risikovurderinger

Hovedparten af de amter, der har besvaret spørgeskemaet, har svaret, at de anvender Miljøstyrelsens Vejledninger nr. 6 og 7, 1998 i forbindelse med risikovurderinger for lossepladsgas, og enkelte amter har anvendt eller forsøgt at anvende det af Miljøstyrelsen udviklede regneark JAG G.

Et af problemerne ved anvendelsen af Miljøstyrelsens vejledninger og regnearket JAG G er, at beregningerne af gasindsivningen skal foretages under vurdering af en "worst case situation". Som det fremgår af bl.a. bilag 1, afsnit 4 i nærværende rapport, er gassens indtrængninger i bygninger dårligt belyst. En vurdering af worst case forhold er derfor vanskelig. Tre af de faktorer, som har stor indflydelse på den resulterende gaskoncentration i bygningen er trykforskellen over gulv, opblandingshøjden og luftskiftet.

Enkelte amter har svaret, at de anvender et risikovurderingskoncept, som de selv har fået udviklet. Koncepterne, der typisk er udviklede i starten af 1990'erne, har alle den ting til fælles, at de ikke anvendes til en egentlig risikovurdering af de enkelte lossepladser, men anvendes til en form for risikostyring/prioriteringssystem. Systemerne anvendes således både til at foretage en udvælgelse af de lossepladser, hvor risikoen vurderes at være størst, og hvor amtet derfor vil prioritere at få foretaget egentlige

gasundersøgelser, samt til udvælgelse af de lossepladser, hvor der ikke anses at være risiko, og hvor amtet derfor ikke vil foretage yderligere undersøgelser.

2.5 Afværgeforanstaltninger

Stort set alle amter har svaret, at der er udført afværgeforanstaltninger på 2 eller flere af de nedlagte eller idriftværende lossepladser i amtet. Hovedparten af amterne har således erfaringer med og viden om gasafværgeforanstaltninger. For de fleste amter gælder dog, at detailkendskabet til foranstaltningerne og deres virkemåde ligger hos de projekterende rådgivere, samt til en vis grad hos affaldsselskaberne for de idriftværende affaldsdeponier.

Af amternes svar fremgår det, at for de idriftværende affaldsdeponier betragtes en eventuel gasindvinding også som afværgeforanstaltninger. Internationale erfaringer viser dog, at et gasindvindingsanlæg til udnyttelse af lossepladsgassen ikke kan erstatte egentlige afværgeforanstaltninger. Dette skyldes primært, at den overordnede styring af et gasindvindingsanlæg tilrettelægges med henblik på energiudnyttelsen, og ikke af sikkerhedshensyn for de omkringliggende huse. Der er flere eksempler på, at der er opstået kritiske situationer ved lossepladser, hvor gasindvindingsanlægget er midlertidigt stoppet eller neddrolet af hensyn til energiudnyttelsen.

Hovedparten af amterne har svaret, at der foretages monitoringsprogrammer i forbindelse med afværgeforanstaltningerne, og at det er muligt at sammenfatte og bearbejde disse data. I hvor høj grad disse data kan anvendes til effekt vurderinger af foranstaltningerne, og om dataene vil give yderligere information om produktion og spredning af lossepladsgas kan ikke vurderes på baggrund af det indsamlede materiale.

3 Udenlandske erfaringer

Udenlandske data er indhentet dels via projektgruppens internationale samarbejdspartnere og dels via Miljøstyrelsens kontakter i andre landes miljømyndigheder. De forskellige kontakter har modtaget breve samt spørgeskemaer. Spørgeskemaerne, se afsnit 2.1, omfatter kendskab til ulykkehændelser forårsaget af lossepladsgas samt oplysninger omkring fremgangsmetoder, standarder, bedste praksis samt retningslinjer i forbindelse med undersøgelser og risikovurderinger med relation til lossepladsgas. Herudover er centrale personer i USA og Canada blevet kontaktet telefonisk.

Hvor specifikke forhold eller lossepladshændelser er beskrevet i litteraturen, er litteraturen indsamlet i nødvendigt omfang.

Litteratursøgning i relevante databaser

Der er foretaget internetsøgninger på internationale miljøstyrelers hjemmesider (Environmental Protection Agency (EPA) internetsites), når de indhentede oplysninger fra spørgeskemabesvarelser og litteratur gav indtryk af, at det pågældende land havde noget om lossepladsgas. De anvendte søgeord er ***landfill, landfill gas, landfill and accident, landfill and explosion, risk assessment and landfill*** samt kombinationer heraf. De besøgte hjemmesider er www.environment-agency.gov.uk, www.ubavie.gv.at, www.epa.gov og www.ec.gc.ca. Søgningen giver resultat i form af henvisninger til beskrivelser af lugtproblemer, grundvandsforureningsproblemer, klimaændringer eller beskrivelse af afbrænding og energimæssig udnyttelse af lossepladsgas. På nær EPA-siderne for England og USA er der ikke fundet nogen internetsites med data eller oplysninger om lossepladsgas, som falder under kategorien ulykker, gashændelser eller risikoanalyser. Der kan på Englands EPA-side findes henvisninger til guidelines for lossepladsgas (CIRIA og Waste Management Papers). Disse er indhentet via projektgruppens internationale samarbejdspartnere. På US-EPA's internetsider findes der i nogle få af de indlagte site-vurderinger beskrivelser om problemer med gasmigration fra lossepladser og indsivning i bygninger og bygværker. Flere af de beskrevne hændelser er dog genfundet i litteraturen.

Erfaringsudveksling

Tre af projektgruppens medlemmer har i 1999 deltaget i en konference om lossepladser (Sardinia 99 Seventh Waste Management and Landfill Symposium). Ved opslag på konferencen blev der samlet en diskussionsgruppe af interesserede, hvor erfaringer blev udvekslet. Efterfølgende blev der fremsendt spørgeskemaer til nogle af deltagerne, dog er der ikke modtaget svar fra disse. Det overordnede indtryk fra konferencen var, at der er kendskab til hændelser og ulykker, som involverer lossepladsgas i flere lande, men at der ikke haves erfaringer med eller metoder til risikovurderinger af lossepladsgas indtrængen i huse og bygværker.

3.1 Spørgeskemaer

Der er udsendt spørgeskemaer til 29 af projektgruppens internationale samarbejdspartnere (svarende til 29 forskellige lande) og 40 af Miljøstyrelsens kontakter, hvoraf hhv. 16 og 11 har sendt et udfyldt skema retur. En liste over de internationale samarbejdspartnere og miljøstyrelser, som har modtaget et spørgeskema, er gengivet i tabel 3.1. I tabellen er de, som har besvaret spørgeskemaet eller sendt brev om, at de ingen oplysninger har, markeret med fed skrift.

Det anvendte spørgeskema er angivet i følgende figur 3.1. Hvor formuleringen til kontakter via Miljøstyrelsen adskiller sig fra formuleringen til private samarbejdspartnere er formuleringen til Miljøstyrelsens kontakt angivet med kursiv i parentes. Spørgsmål 1 er ikke stillet til Miljøstyrelsens kontakter.

Tabel 3.1 Internationale samarbejdspartnere og miljøstyrelser, som har modtaget et spørgeskema. Fed skrift markerer, at den pågældende instans har besvaret spørgeskemaet

Land	International samarbejdspartner	Miljøstyrelse
England	Aspinwall	-
Holland	Tauw	Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment Department of Soil Protection (IPC 625)
Frankrig	Tauw	Ministère de l'Environnement. Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques Service de l'Environnement Industriel
Belgien	Tauw	SPAQUE OVAM
Norge	Hjellnes COWI	Norwegian Pollution Control Authority
Sverige	VBB-Viak	Swedish Environmental Protection Agency
Finland	Soil &Water Ltd.	Ministry of the Environment
Irland	M. C. O'Sullivan & Company Ltd	Environmental Protection Agency
Tyskland	BaUm COWI	Ministry of the Environment
Østrig	Wilfried Pistecsky Consulting Engineering	Umweltbundesamt, Altlastenabteilung
Schweiz	-	Swiss Agency for the Environment
Spanien	Covitecma	EMGRISA
Portugal	Hígidus	Ministerio do Ambiente
Italien	D'Appolonia S.p.A	ANPA
Grækenland	ECOS Consulting	Ministry of Environment, Physical Planning and Public Works
Makedonien	-	Ministry of Environment
Tyrkiet	ACS ENGINEERING AND CONSULTING CO. INC.	-
Estland	Maves	Ministry of the Environment
Letland	-	State Geological Survey of Latvia
Lithaun	UAB COWI Baltic	Ministry of Environment
Polen	COWI Polska	Ministry of Env. Protection, Nat. Res. and Forestry

Land	International samarbejdspartner	Miljøstyrelse
Czechiet	Aquatest	Ministry of Environment
Slovakiet	Aquatest	Soil Science and Conservation Research Institute
Rusland	COWI Moscow	The State Committee on Environ. Protection
Ukraine	Ukrainian Research Institute of Water Management & Ecological Problems	-
Georgia	-	Ministry of Environment
Azerbajan	-	State Committee on Ecology and Control of Nat. Res., Utilization
Belarus	-	Ministry for Emergencies
Armenien	-	Ministry of Nature Protection
Moldavien	-	Ministry of Environment
Slovenien	-	Ministry of the Environment Nature Protection Authority
Bosnien and Herzegovina	-	Federal Ministry of Physical Planning and Environment Institute for Agropedology
Kroatien	-	State Directorate for the Environment
Ungarn	EdiCon – Environmental Diagnosis and Pollution Control Consultants	Ministry for Environment
Romænien	-	Research and Engineering Institute for Environment
Bulgarien	-	National Centre of Environment
Israel	-	Ministry for Environment Hazardous Substances Division
Japan	-	Soil and Agricultural Chemicals Division Water Quality Bureau Japan Environment Agency
Philippinerne	COWI Philippines, Inc.	-
Indien	MSG Environmental Services Pvt. Ltd.	-
Argentina	Team Profesionales Asociados SRL	-
Syd Afrika	Kagiso COWI Development Planning Consultants	Department of Water Affairs and Forestry
USA	Ben C. Gerwick, Inc. Consulting Engineers	-
Canada	Buckland and Taylor Ltd.	-
Argentina	-	Comisión de Ecología y Medio Ambiente Provincia de Buenos Aires/Argentina
Brasilien	-	CETESB
New Zealand	-	Ministry for the Environment Secretary for the Environment Pollution and Risk Management Directorate
Australien	-	Department of Environment and Natural Resources Office of the Environment Authority

QUESTIONNAIRE	
Company (<i>Public Authority</i>): Name and position of person filling out the questionnaire: Email-address/phone no.: Future contact person:	
1)	Have you or has your company been involved in landfill gas investigations and if so, with respect to what?
2)	Do you have knowledge of accidents, e.g. explosions, caused by migrated landfill gas? Yes ☐ No ☐ IF YES 2a) Please describe the accident: What kind of accident was it (e.g. fire, indoor/outdoor explosion, don't know)? Where and when did it happen (city, state/country, date, don't know)? What were the surroundings (e.g. type of landfill, buildings, vicinity (city or rural), don't know)? What was the consequence of the accident (loss of life, injure of people, damage of property, don't know)? <i>(Please state where detailed information on the accident/incidence and the involved landfill can be obtained (e.g. weather conditions, geology/hydrogeology, characteristics of the landfill, landfill gas monitoring results, distance of building from landfill, details on the floor construction of the building etc.))</i>
3)	In Denmark a lot of old and closed landfills are being used for urban development such as industrial estates or domestic housing. Do you have the same practice in your country? Yes ☐ No ☐ IF YES 3a) Is landfill gas a concern with respect to land utilisation?
4)	Is landfill gas migration a subject of concern with respect to explosion risks in buildings located nearby landfills? Yes ☐ No ☐ IF YES 4a) Is it a subject of concern for ongoing landfills? Yes ☐ No ☐ 4b) Is it a subject of concern for closed landfills? Yes ☐ No ☐
5)	Is it common procedure to carry out risk assessment of landfill gas with respect to gas migration into nearby buildings? Yes ☐ No ☐ IF YES 5a) Do you have standards or best practices for the risk assessment?
6)	Is it common procedure to carry out field investigations of landfill gas production? Yes ☐ No ☐ IF YES 6a) Does your company or the authorities have best practices or standards for the investigations of landfill gas production? Yes ☐ No ☐

7)	Is it common procedure to collect data for the evaluation/risk assessment of landfill gas migration (with respect to e.g. explosion hazards, greenhouse effect, plant growth etc.)?
	Yes ☐ No ☐
	IF YES
7a)	Does your company or the authorities have best practices or standards for the evaluation/risk assessment of landfill gas migration?
	Yes ☐ No ☐
8)	To which authorities are results of landfill gas investigations reported (please, list name of authority)?
	a) local authorities: b) regional authorities: c) central authorities:
9)	Is landfill gas a subject of concern when closing a landfill?
	Yes ☐ No ☐
	IF YES
9a)	Are any precautions taken?
	COMMENTS:

Figur 3.1 Spørgeskema anvendt til indsamling af oplysninger fra internationale kontakter.

3.2 Kendskab til gasulykker

De gennem spørgeskemaerne indhentede supplerende ulykkesdata omfatter kendskab til og korte beskrivelser af mindre og større ulykker forårsaget af indtrængende lossepladsgas i bygninger, bygværker (eks. rørføringer og mandehuller hertil samt operatørhuse) og på friluftsarealer.

Forsøg på at indhente supplerende oplysninger eller litteratur om de i spørgeskema-besvarelsene og i litteraturen nævnte gashændelser viste hurtigt, at de derved fremkomne oplysninger ikke stod mål med anstrengelserne for at skaffe dem. Mange af de nævnte gashændelser er oprindeligt kun beskrevet med et kort notits i en lokal avis, dvs. der eksisterer ingen rapport og slet ingen tekniske målinger af de parametre, som kunne belyse gashændelsen nærmere. Da disse forhold tydede på, at der ikke ville kunne indsamles tilstrækkeligt detaljerede oplysninger til at behandle data statistisk, blev det derfor valgt at fokusere på, at de indsamlede data skulle illustrere scenarier for gashændelser, således at alle tænkelige scenarier inddrages i opstillingen af barrierediagrammerne.

Med dette for øje er alle besvarelser af spørgeskemaer fra internationale samarbejdspartnere og miljøstyrelser, samt de i litteraturen bedst beskrevne hændelser opsummeret i tabel 3.2. Tabellen sigter derfor på at illustrere alle forskellige situationer og konsekvenser. I tabellen er data opdelt i hændelser, som er sket på arealet på selve lossepladsen (LP) og hændelser, som er sket på arealer udenfor en losseplads. En del af de i /3/ nævnte 60 rapporterede gashændelser er udeladt, dels fordi beskrivelserne af disse var så uklare, at der var tvivl om hvilken type gashændelse, der var tale om, og dels fordi at de ikke kunne bidrage med ny oplysninger. Mange af hændelserne i /3/ er også beskrevet i samlet rapport og ikke enkeltvis, idet enkeltbeskrivelserne i kilden ikke indeholdt ekstra oplysninger end de anførte.

Der er således ikke foretaget statistiske vurderinger af materialet grundet manglende detailoplysninger.

Tabel 3.2 Opsummering af ulykkesdata. I tabellen er losseplads forkortet med LP. Endvidere er kilderne opgivet som international samarbejdspartner (IS) af hensyn til ønsker om anonymitet og Miljøstyrelse i det pågældende land (MST). Spørgsmålstegn angiver manglende oplysninger eller usikkerhed omkring det opgivne

Land og sted	Års- tal	Afstand til LP	Hændelse og kommentarer	Konsekvenser	LP's drifts- periode	Kil- de
Hændelse PÅ losseplads, Bygninger:						
Borum Landfill site, Oslo, Norge	1993	På LP?	Ekspllosion i lossepladsens operatørhus. Mand blæst 25 m ud af hus.	1 person såret (3 måneders sygeorlov, hospitalsbehandling). Bygværk ?	Eksiste- rende	IS
Faaborg Losse- pladser, Faaborg, Danmark	1995	På LP	Gasekspllosion i Sportshal ved reno- vering af gulv, som havde sat sig pga. sætninger i LP-fyldet. Til det ny gulv blev irammet piloteringspæle. Efter weekend skulle piloteringspæle afskæres til passende længde. Ekspllosion skete da håndværker tændte for vinkelsliber.	Piloteringspæl ødelagt, håndværker tilskadekommet	1940- 1975	IS
Hollaberergraben, Wien, Østrig	1999	På LP	Gasindtrængen i sommerhusboliger. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	?	Nedlagt siden 1960	MST
Löwygrube, Wien, Østrig	1989	På LP	Gasindtrængen i sommerhusboliger. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	?	Nedlagt siden 1965	MST
Canada, England og USA	1968- 1981	På LP	10 rapporteringer om eksplosioner, heraf bl.a. 4 i forbindelse med nybygning, ombygning og vedligeholdelsesarbejder, 2 hvor bygninger havde utæt rørføring og 2 hvor eksplosion skete i toiletrum. Alle lossepladser ukontrollerede	Omkomne og tilskade- komne personer, beskadigelse og ødelæggelse af bygninger	Fortrins vis lukkede losse- pladser	/3/
Hændelse PÅ losseplads, Bygværker:						
Sverige		På LP?	Ekspllosion i pumpehus			IS
Canada, England og USA	1968- 1981	På LP	12 rapporteringer om eksplosioner eller brande i mandehuller og rørføringer. Heraf bl.a. 3 i forbindelse med renovation/reparationsarbejder, 2 med 12-15 m høje flammer i mandehuld og 2 med relation til indtrængende perkolat i drænsystemet. Alle lossepladser ukontrollerede	Omkomne og tilskade- komne personer, beskadigelse og ødelæggelse af bygninger	Fortrins vis lukkede losse- pladser	/3/

Land og sted	Års- tal	Afstand til LP	Hændelse og kommentarer	Konsekvenser	LP's drifts- periode	Kil- de
Hændelse PÅ losseplads. Ingen bygninger/bygværker:						
Pääsküla Landfill, Tallinn, Estland	1995 og før	På LP	Brande i og ovenpå losseplads.	Røg og luftforurening til gene for borgere i Tallinn, samt omkostninger ved brandbekæmpelse	?	IS
Marseille, Frankrig	1998	På LP?	Udendørs eksplosion i losseplads tæt på by	?	?	IS
Payatas Open Dumpsite, San Mateo Landfill, Philippinerne	?	På LP?	Brande og udendørs eksplosioner	Ejendomsbeskadigelse	?	IS
Karistiskės landfill, Vilnius, Lithaun	1995	På LP?	Brande og udendørs eksplosioner	Personer sårede	?	IS
Hændelse UDENFOR losseplads. Bygninger:						
Kilcullen, County Kildare, Irland	midt 1998	>500 m?	Gasindtrængen i beboelse langt fra losseplads. Losseplads ukontrolleret og etableret i gl. sand- og grusgrav med dybde på 15-20 m.	Familie evakueret	Eksisterende	IS
Greentree Landfill, Madison, USA	1983	100 m	Ekspllosion i bolig. Lov om VVS-arbejde krævede eksistens af to huller i kældergulvfundament. Kraftigt regnvejr i 2 dage forud for ulykken, rekord lavtryk dagen før ulykke. Igangværende gasmigration mod syd og vest var ikke dækket af eksisterende gasmonitering. Nedsat effektivitet i LP's eksisterende gasekstraktionssystem.	2 personer indlagt for forbrænding, 1 enhed af hus ødelagt og 1 enhed af hus beskadiget	1973-1980	/4/
Loscoe, Derbyshire, England	1986	70 m	Ekspllosion i bungalow. Losseplads etableret i tidligere råstofgrav (ler, sten og kul). En kulåre strakte sig fra LP ind under bebygget område. LP afdækket med porøst jordlag i 1982, men slutaftdækket med lerlag kort før eksplosion. Flere klager i området over observeret vegetationsskade, kloak/rådlugt, jordvarme, gasbobler i jordvand etc.	3 personer svært sårede, bygning ødelagt	1966-1982	/5/
Skellingsted, Danmark	1991	20 m	Ekspllosion i bolig. Kraftigt regnvejr i periode forud for ulykken, kraftigt lavtryk under selve ulykke. Lossepladsen blev slutaftdækket med jord i 1989-90.	2 personer omkommet, 1 bygning beskadiget	1970-1990	/6/
Ligibell site, Colmar, Frankrig	1991	20 m	Gasindtrængen i kælder i beboelseshus efterfulgt af eksplosion. Losseplads slutaftdækket med 1 m ler. Grundet streng vinter var LP's topjord frosset til en dybde af 50 cm.	1 bygning ødelagt	1974-1988	/7/

Land og sted	Års- tal	Afstand til LP	Hændelse og kommentarer	Konsekvenser	LP's drifts- periode	Kil- de
Alois-Gerstl-Weg, Feldbach (Styria), Østrig	1992- 1993	0 m	Gasindtrængen i boliger. Bygninger på kant til LP. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	?	Nedlagt siden 1975	MST
Municipality of Schwechat, lower Austria, Østrig	1982	?	Ekspllosion i kælder i bolig. LP omgivet af bygninger.	1 person omkommet	?	IS
Wageneder Schottergrube, Laakirchen, Østrig	1989- 1991	?	Indendørs/udendørs eksplosioner. LP beliggende i by tæt på bygninger og svømmehal. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	Intet rapporteret	Nedlagt siden 1989	MST
Rudolf-Zeller- Gasse, Wien, Østrig	1988- 1991	?	Gasindtrængen i boliger. LP i boligområde. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	?	Nedlagt siden 1963	MST
Hekimbasi, Istanbul, Tyrkiet	1999	0 m?	Udendørs eksplosion i losseplads medførte "affaldsskred", som gik ud over slumbebyggelse.	39 personer omkommet, 11 sårede, slumbebyggelse ødelagt	?	IS
Kent, England	1987	7 m	Ekspllosion i køkken mellem Jul og Nytår, hvor lossepladsens eksisterende gasekstraktion var lukket ned pga ferie i den fabrik, som aftog lossepladsgassen. Ukontrolleret losseplads i tidligere kalkgrav	Tilskadekommen person, beskadiget bygning	?	/3/
Hændelse UDENFOR losseplads, Bygværker:						
Deponie Rautenweg, Wien, Østrig	1990'erne?	?	Ekspllosion i brønd. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	1 arbejdsmand omkommet	Eksisterende	MST
Oslo old landfill area, Oslo, Norge	1996	?	Ekspllosion i mandehul til dræn på legeplads ved nedlagt losseplads. Industriområde udviklet på lossepladsen.	12-årig dreng lettere forbrændt på ansigt og hænder (2-3 ugers sygeorlov, hospitalsbehandling). Dræn?	?-1960/ 1970	IS
Mülldeponie Helene Berger, Weikersdorf, Østrig	1980'erne	?	Ekspllosion i brønd. Ukontrolleret losseplads etableret i porøst sediment eller porøs klippe.	Brønd beskadiget	Eksisterende	MST
Masserano landfill, Biella, Italien	1995	100 m	Ekspllosion i grundvandsbrønd. Gasudslivning fra en meget stor kontrolleret losseplads anlagt i lergrav	Landmand fik så svære skader, at han døde nogle dage senere	Eksisterende	/21/
Japan, USA og England	1976- 1985	?	5 rapporteringer om eksplosioner i tunneler og rørledninger antændt af arbejdere eller børn.	Tilskadekomne og omkomne personer, beskadigede og ødelagte bygværker	?	/3/
Andet:						
Czech Republic	?	?	Data ikke udleveret, men der haves kendskab til gasulykker	?	?	IS

Som det fremgår af tabel 3.2, findes der mange rapporterede tilfælde af lossepladsgas-hændelser, men som før nævnt findes der desværre ikke nok data til at kunne lave en detaljeret analyse af ulykkesårsagen. Oftest er man først klar over, at der var et problem, efter ulykken er sket, og rapporterne indeholder derfor kun 2 linjer f.eks. om, at der har været en eksplosion i et hus nær en losseplads.

En del af forklaringen på den manglende erkendelse af et eksisterende problem kan være, at betegnelsen losseplads flere steder i udlandet kun bruges eller kun er blevet brugt om en igangværende losseplads, mens nedlukkede lossepladser betragtes som fyldpladser og slet ikke anerkendes som et potentielt problem mht. gasproduktion. En anden forklaring kan, som flere af de adspurgte lande nævner, være, at der i nogle lande (endnu) ikke anlægges bebyggelse på eller nær lossepladser.

Det bør nævnes, at der kan være forskel på måden at drive og anlægge lossepladser på i andre lande sammenlignet med Danmark, og at geologien og klimaet også kan give nogle unikke scenarier for det enkelte land. Generelt gælder dog, at der eksisterer en vis bekymring for risici fra lossepladsgas i bygninger nær lossepladser i de lande, hvor man har oplevet eksplosionsulykker eller brande forårsaget af lossepladsgas.

I det følgende er det derfor tilsigtet at give en kvalitativ beskrivelse af de forekommende ulykkes-scenarier. Ud fra tabellen kan gøres følgende observationer:

- Overraskende mange eksplosioner er sket i forbindelse med håndværkerarbejde eller driftsarbejde. Mange af disse er sket på lossepladser, hvor gas formodes at være tilstede under normale forhold, og i bygværker, hvor håndværkere og arbejdere færdes langt mere end andre mennesker.
- Der sker ikke kun ulykker i boliger – også for bygværker såsom rørføringer o.l. findes mange rapporter om gashændelser med meget alvorlige eller potentielt meget alvorlige udfald (eksempelvis en legeplads med eksplosion i et mandehul). Ligeledes haves rapporter om eksplosioner og brande på udendørs arealer, som om ikke andet kan have sekundær effekter såsom affaldsskred eller gener fra røg og luftforurening. Dette skal ses i betragtning af at det i nogle lande (f.eks. Spanien og Tyrkiet) er kutyme at anlægge parker, sportsarealer og golfbaner ovenpå lossepladser, og at der samtidig i sådanne tilfælde sjældent er en erkendelse af, at den underliggende losseplads kan udgøre en risiko mht. lossepladsgassen.
- Endeligt omfatter de opgjorte konsekvenser af gasulykker/hændelser mere end menneskeliv. Risiko kan udover menneskeliv og tilskadekomst også opgøres i omkostninger ved hospitalsophold, tabt arbejdsfortjeneste, materialeskade, brandbekæmpelse og omkostninger ved efterfølgende påkrævet installation af afværgeforanstaltninger m.m.
- Der kan ske gasindtrængen fra lossepladser som har en alder på 40 år - og i huse, som ligger op til 500 m fra en losseplads.

Det mønster, som tegnes, når beskrivelser af gasulykker sammenstilles, peger på, at der overordnet synes at være to typer af hændelser. Der kan dog ikke skelnes helt mellem disse to typer, idet en gashændelse tit er et resultat af mange samspillende faktorer.

Ved den ene hændelse er lossepladsgas tilstede under normale forhold. F.eks. kan gas være tilstede under et hus eller i husets hulrum eller omkring et dræn, når dette findes ovenpå/i gasproducerende fyld. En ulykke er her typisk betinget af, at der i forbindelse med håndværker arbejde, renovering, reparation, konstruktion m.m. skabes kontakt til gassen. Langt de fleste rapporterede tilfælde i tabel 3.2 omhandler ulykker, som er opstået ved en eller anden form for renovationsarbejde eller operationelt arbejde.

Ved den anden type hændelse er gassen tilstede som følge af pludseligt ændrede betingelser. Dvs., der opstår pludselig gasmigrationsfremmende forhold, hvor gassen vil bevæge sig andre steder hen, end hvor den normalt findes. Her kan være tale om ekstreme pludseligt ændrede vejrforhold eller afskæring af gassens normale migrationsvej ved f.eks. slutaftdækning af losseplads, belægning af et førhen frit areal, en frostperiode, hvor det frosne vand i topjorden forsejler overfladen eller sågar ved, at et installeret afværganlæg svigter.

3.3 Undersøgelsesmetodikker

Der findes flere standarder og guidelines for undersøgelse af en losseplads gasproduktion – bl.a. fordi der i flere lande p.t. eksisterer krav om gassikring ved nedlukning af lossepladser og ved drift af eksisterende lossepladser. Nogle lande benytter nationale retningslinjer, mens de anvendte monitoringsprocedurer i andre lande er knyttet til private firmaer. Af lande, som har standarder eller guidelines for undersøgelse af lossepladsgas kan nævnes Holland, Norge, Frankrig, Østrig, Sverige, Tjcekkiet, Canada og England.

Irland knytter sig ifølge spørgeskemabesvarelsen (ligesom Danmark) til Englands guidelines, som de står opgivet i Waste management Paper no. 27, /8/, mens bl.a. Spanien bruger U.S. EPA guidelines for gasproduktionsmåling. Der forventes at udkomme en vurdering af Waste Management Paper no. 27 i år 2000 fra det Engelske EPA.

Ingen af de adspurgte lande måler gasproduktion med henblik på en vurdering af gasmigration ind i nærliggende bebyggelser.

3.4 Risikovurderinger

Hvis der udføres en risikovurdering af gas i en losseplads, er det for det meste med hensyn til lugt, drivhusgas, vegetationsskader og støj fra ventilationsrør. Der findes generelt meget få officielle guidelines, som sigter på at analysere risikoen for eksplosion ved indtrængen af lossepladsgas fra undergrunden i bygninger. På lige præcis dette område synes kun England at have materiale, især i form af CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) rapport no. 152, /9/. Til gengæld findes der veludviklede risikoanalyseværktøjer til konventionelle analyser af gaseksplosionsrisici i industriøjemed. Også når det gælder anlæg til udnyttelse af lossepladsgasproduktion. Guidelines for en generel risikoanalyse af lossepladsgas kan findes i Englands Waste Management Paper no. 26B (Landfill Design, Construction and

Operational Practice). Fra Australien forlyder, at de er ved at udarbejde guidelines for risikoanalyser.

Der er ikke ved søgning i USA fundet nogen systematisk fremgangsmetode for risikovurdering af indsvivning af lossepladsgas i huse, skønt man er bekendt med, at der er en risiko for gasmigration fra lossepladser og ind i konstruktioner. I guidelines fra U.S. EPA nævnes, at eventuelle receptorer for lossepladsgasmigration skal identificeres, og at dette kan gøres ved at måle gaskoncentrationer på de pågældende lokaliteter. Der er ved flere lejligheder blevet udført risikovurderinger ved ældre lossepladser. Disse vurderinger har dog ikke fulgt opstillede vurderingsmetoder, men har været udført "case-by-case" hvor en større eller mindre grad af lokal kendskab har været inddraget /11/.

I Canada har man fra den lokale miljøstyrelse opstillet en metode for at vurdere risikoen for gasmigration fra lossepladser /10/. Metoden tager udgangspunkt i fremstillede diagrammer, som kan benyttes til at klassificere en losseplads i forhold til følgende tre faktorer:

- Potentialet for produktion af gas
- Afstand til potentielle receptorer af gas emitteret til atmosfæren
- Potentialet for migration af gas og indtrængning i bygninger/bygværker

Metoden er kun tiltænkt som et indledende trin i en vurdering af påvirkninger fra lossepladsgas.

Lossepladsgasproduktionen vurderes ud fra en første ordens nedbrydningsmodel, som også benyttes af USEPA. Til vurdering af migrationen benyttes en 2D matematisk model som køres under forskellige scenarier. Herudfra konstrueres et diagram, som ud fra jordtype og afstand til lossepladsen inddeler risikoen i tre grupper. Metoden må karakteriseres som relativt generel, idet der kun kræves lidt lokal kendskab.

Af de udsendte spørgeskemaer fremgår, at der i Norge og Østrig lejlighedsvis udføres vurdering af risici for indsvivning af lossepladsgas i nærliggende bygninger. Men der haves ingen standarder herfor. Det fremgår endvidere, at nogle steder i Tyskland består en risikoanalyse for gasmigration i at måle i husene, om metankoncentrationen er mindre end 5%.

I /9/ er der ligeledes foretaget en undersøgelse af, om der findes metoder til at vurdere risikoen for indsvivning af lossepladsgas i huse nær lossepladser. Kilden konkluderer, at der hverken i USA, Canada, England, Skandinavien, Tyskland eller Frankrig findes fyldestgørende risikoanalyser mht. indtrængen af lossepladsgas i bygninger og den herved fremkomne risiko. Dette faktum er for USA og Canadas vedkommende blevet bekræftet i 2000 via forespørgsel til flere af de to landes førende lossepladsgaseksperter.

3.5 Monitorering og grænseværdier

I flere lande er der opstillet krav til monitorering af poreluft og indeluft på og omkring lossepladser for at kunne opdage en eventuel gasmigration eller gasindtrængning. Det er kendetegnende, at det langt overvejende er grænseværdier for metan, som opstilles. I **USA** har USEPA i 1991 opstillet følgende retningslinier for gas monitorering på kontrollerede lossepladser /12/:

- Metankoncentrationen i bygværker indenfor lossepladsens afgrænsning må ikke overstige 1,25 %(vol) svarende til 25% af LEL.
- Metankoncentrationen i poreluft må ikke overstige 5 % (vol) udenfor lossepladsens afgrænsning (svarende til 100% LEL).

Der skal opstilles en monitoringsplan, hvor der som minimum skal monitoreres en gang i kvartalet, for at kunne vurdere eventuelle sæsonvariationer /13/. Der er dog ikke nævnt hvornår, der skal monitoreres i forhold til lavtryk, nedbørshændelser mm.

De enkelte stater i USA kan i princippet godt opstille strengere regler end de ovennævnte. Californien, New Jersey, Pennsylvania, Illinois og Alabama har således opstillet strengere krav /10/. For lossepladser afsluttet før 1991 er der ikke opstillet føderale regler, og det er op til de enkelte stater at opstille retningslinier for disse. I mange tilfælde er der ikke opstillet regler, og det kan være op til det lokale "county" (amt), eller sågar kommune at opstille krav og retningslinier i konkrete tilfælde /14/. I North Carolina benyttes i princippet de samme regler som de ovennævnte for ældre pladser godkendt før 1991. Før 1980 blev lossepladser ikke godkendt, og for disse pladser bliver der ikke monitoreret. Der er heller ikke gennemført risikovurdering for disse pladser /15/.

I **Canada** er der ikke opstillet føderale retningslinier, her er det op til de enkelte provinser at opstille lokalt gældende regler. Kun tre af de i alt 12 provinser har opstillet grænseværdier, nemlig de tættest befolkede provinser British Columbia, Ontario og Quebec.

I **British Columbia** er regelsættet stort set svarende til de amerikanske, dog således at den førstnævnte grænser på 25% LEL gældende for bygværker indenfor lossepladsens afgrænsning også er gældende for bygværker udenfor lossepladsen.

Ontario har fået nye regler pr. 1998. Her fastsættes, at der ved nye lossepladser altid skal laves en vurdering af risikoen for gasmigration (uden at det specificeres hvordan), og der er opstillet følgende grænseværdier /16/:

- Metankoncentrationen i poreluft må ikke overstige 2,5 %(vol.) udenfor lossepladsens afgrænsning (svarende til 50 % LEL).
- Metankoncentrationen i bygninger (inklusive deres fundamenter) indenfor lossepladsens afgrænsning må ikke overstige 1 % (vol.) (20 % LEL)
- Metankoncentrationen i bygninger (inklusive deres fundamenter) udenfor lossepladsens afgrænsning må ikke overstige 0,05%(vol.).

De nye regler kræver også, at nye lossepladser etableres med en bufferzone omkring det opfyldte areal. Denne bufferzone skal være mindst 100 meter bred. Afstanden kan dog nedsættes til mindst 30 meter, hvis det dokumenteres, at den valgte afstand er tilstrækkelig til at undgå uacceptabel påvirkning af omgivelserne. For lossepladser etableret før 1998 findes et andet regelsæt /17/, som tillader metankoncentrationer op til 20 % LEL i fundamenter for bygninger udenfor lossepladsens afgrænsning. Dette regelsæt er under revision, og de nye regler vil formentlig komme til at ligne de nye regler gældende for lossepladser konstrueret efter 1998 /18/.

Quebecs gældende regelsæt er fra 1993. Her fastsættes følgende /19/:

- Metankoncentrationen i bygninger eller bygværker indefor lossepladsens afgrænsning, samt i poreluft ved lossepladsens afgrænsning må ikke overstige 1,25 % (vol.) (svarende til 25 % LEL).
- Der skal opstilles en monitoringsplan med minimum kvartalsvise prøvetagninger. Der skal som minimum være fire monitoringsboringer.

Man er desuden i færd med at lave regler for gamle lossepladser, hvor der i øjeblikket ikke findes regelsæt.

3.6 Afværgeforanstaltninger

Som før nævnt er der i flere lande krav til drift og nedlukning af lossepladser mht. gasproduktion. Myndighederne fastsætter ofte krav om installation af systemer til opsamling af lossepladsgas fra større lossepladser.

Opsamling af produceret gas for større lossepladser er oftest den eneste nævnte afværge i det indhentede materiale. Af afværgesystemer nævnes opsamlings- og forbrændingssystemer (USA, Canada, Holland, Irland, Norge, Grækenland, Tjekkiet, Sverige, Tyskland, Østrig, Estland), passiv ventilation (Irland, Tyrkiet) elproducerende ekstraktionsenheder (Frankrig, Tyskland), metan-oxiderende topdække for små lossepladser (Norge) eller blot monitoring (Litauen, Slovakiet, Østrig).

I guidelines fra U.S. EPA kan man bl.a. læse, at mht. risiko for gasmigration til receptorer, kræves der installation af aktive systemer til gasopsamling, når gasmålinger overskrider 5% metan ved skel til lossepladsen eller ved lossepladsens topdække, eller hvis 25% metan LEL værdien overskrides på eller ved konstruktioner på selve lossepladsen.

I Spanien kan der til tider pålægges en sikkerhedsafstand til byggezone ved nedlagte lossepladser eller pålægges restriktioner i arealanvendelsen. Visse steder i Tyskland må nedlagte lossepladser først bebygges efter 20 år, men dette krav er primært af hensyn til stabiliteten af undergrunden. Af litteraturen, særligt /9/, fremgår, at England ligeledes opererer med sikkerhedszoner indenfor hvilke, der ikke må bebygges eller skal udvises særlig forsigtighed ved påtænkt bebyggelse. Samme kilde nævner, at Tyskland opererer med sikkerhedszoner, men også med geologiske barrierer.

Der er ikke nævnt noget om byggetekniske foranstaltninger i svarene på de udsendte spørgeskemaer, mens der i /9/ nævnes eksistensen af byggetekniske forskrifter i England, som dog ikke er fyldestgørende.

4 Beskrivelse af udvalgte ulykker

4.1 Indledning

I dette kapitel er der foretaget en gennemgang af udvalgte ulykker, der er indhentet oplysninger om. Det har vist sig, at der kun foreligger detaljerede oplysninger om et meget begrænset antal ulykker.

4.2 Gasekspllosion ved Loscoe, Derbyshire, England

Den 24. marts 1986 kl. 06.30 blev et hus beliggende på Clarke Avenue nr. 51, Loscoe, Derbyshire, England, totalt ødelagt ved en eksplosion forårsaget af lossepladsgas /20/. De tre beboere blev hårdt såret men overlevede eksplosionen. Huset havde indlagt naturgas, men gasprøver, der blev udtaget fra ulykkesstedet lige efter eksplosionen, viste sig at have en sammensætning svarende til typisk lossepladsgas (ca. 60 % metan og 40 % kuldioxid). Efterfølgende blev man opmærksom på en losseplads, hvis grænse var beliggende ca. 70 meter fra huset. Denne losseplads var placeret i en tidligere lergrav. Under lergraven forekom der aflejringer af kul. Lergraven var blevet fyldt med affald i perioden 1973 til 1982. Fra 1977 var store mængder af husholdningsaffald indeholdende organisk affald blevet deponeret i graven.

Kort tid før eksplosionen var lossepladsen blevet overdækket med et lerlag, hvilket havde forårsaget forøget horisontal spredning af gassen. Efter eksplosionen blev der udført borer med det formål at udvinde og afbrænde gassen for at forhindre horisontal spredning. Der blev også gravet grøfter for at ventilere gassen, men problemer med høj grundvandsstand og isolerede lommer af affald betød, at der var behov for andre mere permanente afværgeforanstaltninger.

En gasundersøgelse viste, at der var farlige koncentrationer af metan i adskillige nærliggende huse, og mindst to familier blev evakueret.

Geologi

En detaljeret geologisk vurdering af området blev udført under anvendelse af pålidelige geologiske data indhentet i forbindelse med en kortlægning af området i 1960'erne. Denne vurdering viste, at et permeabelt lag af sandsten var skyld i spredningen af gas fra lossepladsen. Området var desuden underlejret af adskillige overfladenære lag af kul. Der var stor sandsynlighed for, at gas kunne transporteres gennem gamle minegange i mindst et af de kullag, der var blevet eksponeret ved lergravens aktiviteter. Sammenstyrtning af minegange under lergravens niveau havde også bidraget til at øge permeabiliteten af de overfladenære jordlag i et større område. Dette havde ført til øget permeabilitet af det lag af sandsten, som førte gas fra lossepladsen til det bebyggede område. Området var dækket af et tyndt lag af tæt ler. Det var forventet, at gassen i sandstenen ville undslippe på steder, der ikke var dækket af ler eller hvor leren var perforeret pga. udgravninger til fundamenter eller underjordiske kabler.

Atmosfæretryk

Da eksplosionen fandt sted, var der et meget kraftigt meteorologisk lavtryk i området. Dette har sandsynligvis forårsaget en trykgradient fra lossepladsen,

hvilket har betydet, at store volumener af gas er sivet op i hulrum under det flydende gulv. Det er ikke blevet identificeret nøjagtigt, hvor gassen er kommet ind i bygningen, men det er muligt, at den er kommet ind via ødelagt murværk rundt om et tilstoppet drænrør, som var ført ind i bygningen under jorden. Antændelsen blev sandsynligvis forårsaget af startflammen fra gasanlæggets varmtvandsbeholder.

Vegetations skader

Det viste sig, at der 2-3 år før gasekspllosionen fandt sted, havde været adskillige rapporter om stresset vegetation i nærliggende haver. Typisk var jorden blevet varm, hvorefter den tørrede ud, smuldrede og endelig gik græsplænen ud. Problemet kom igen selvom plænen blev omlagt. I en have, der lå 90 meter fra lossepladsen, havde ejeren gravet et lille stykke af plænen op i forsøg på at finde ud af, hvorfor den var gået ud. En ubehagelig lugt af "kloak" blev identificeret foruden hvidfarvning af mulden, varme og "en rumlende lyd ligesom en ledning, der var gået i stykker". Der blev gravet et hul på en halv meters dybde, og i dette blev der fundet mudret vand der boblede af gas. Gassen indeholdt en mængde metan svarende til 50 % af den nedre explosionsgrænse, mens der ikke blev fundet noget indhold af carbon monoxid. Husejeren antog, at gassen stammede fra de underliggende kulminer eller fra brændende kullag, så han kontaktede British Coal (tidligere National Coal Board, NCB) som installerede et udluftningsrør med afbrænding af gassen således, at den kunne blive afledt fra jorden. British Coal udførte analyser af gassen, og disse viste, at det var usandsynligt, at det drejede sig om minegas, da minegas har et lavt indhold af kuldioxid. Det blev vurderet, at gassen sandsynligvis stammede fra organisk materiale i forrådnelse.

Uheldigvis blev den fulde betydning af den stressede vegetation ikke opdaget før efter eksplosionen, da boreriger blev udført for at fastlægge grunden til opvarmningen af jorden. I en af borerigerne blev der fundet en gradvis aftagende jordtemperatur: 20,7 °C i en dybde af 0-0,5 m u.t. til 18 °C i en dybde af 2,27 m u.t. Samtidig blev der fundet en stigning af metan koncentrationen i luften fra 2 % ved overfladen til 33,4 % i en dybde af 2,27 m u.t. Gasprøver udtaget i laget af sandsten 1,65 m u.t. indeholdt 29,5 % nitrogen, hvilket indikerede, at metan gassen kunne være blandet med luft. Der blev ikke fundet kulforekomster i boreriger. Hvis et brændende lag kul havde været til stede i undergrunden, ville der have været en stigning i temperaturen, jo tættere man kom på kullaget. Reduktionen i temperaturen i de dybere jordlag og det faktum at der ikke blev fundet et kullag i undergrunden stemte overens med teorien om, at den metan, der bevæger sig mod overfladen, bliver oxideret af bakterier i overjorden, hvorved der udvikles varme. Den gas der blev påvist under oxidationszonen, havde en sammensætning svarende til lossepladsgas.

Området, i nærheden af den udluftningsboreriger NCB havde etableret, havde en lavere temperaturprofil, og der blev kun fundet en begrænset mængde kuldioxid og metangas i poreluften. Dog blev der fundet gas med en sammensætning som lossepladsgas (58 % metan og 39 % kuldioxid) i en dybde af 3 m u.t. i sandstenslaget.

4.3 Gasekspllosion ved Skellingsted, Mørkøv, Danmark

Torsdag den 21. marts 1991 kl. 07.30 skete der en eksplosionsbrand i soveværelset i et hus beliggende Åmosevej 96, Skellingsted ved Mørkøv, i

Vestsjælland, da en beboer i huset ville tænde en cigaret med en lighter. Eksplosionsbranden var forårsaget af indtrængende lossepladsgas. Husets to beboere blev svært forbrændte og døde ca. en uge efter ulykken af deres forbrændinger. Ved eksplosionsbranden forskubbede husets ene væg sig ca. 10 cm.

Bygningen	Huset, hvor eksplosionsbranden skete, var et ældre murstenshus med bræddegulv, der blev nedrevet kort efter ulykken. Huset var omgivet af losseplads på tre sider. Mod nord var der ca. 20 m til en ældre ca. 5-10 m dyb affaldscelle, der var afsluttet i 1977. Mod sydvest var der ca. 40 m til en ca. 6-18 m dyb affaldscelle, der var afsluttet i 1987, og mod sydøst var der ca. 50 m til en ca. 18- 20 m dyb affaldscelle, der var afsluttet i 1990.
Lossepladsen	Skellingsted Lossepladsen er anlagt i 1971 i en tidligere grusgrav. Lossepladsen har hovedsageligt modtaget dagrenovation samt storskrald, industri- og handelsaffald. I driftperioden frem til 1990 modtog lossepladsen ca. 300.000 tons affald, og lossepladsen har et volumen på ca. 540.000 m ³ /22/. Det sidste års tid op til ulykken var det øverste lag affald kompakteret meget hårdt, og der var udlagt et dæklag af sandet muld på ca. 0,7 m tykkelse. Lossepladsen er anlagt uden bund og sidemembran.
Undersøgelser	På selve ulykkesdagen blev der efter ulykken konstateret en gaslignende lugt i huset, der blev kraftigere og kraftigere. Dagen efter ulykken blev der foretaget undersøgelser for lossepladsgas. Ved målinger gennem en udluftningsrist i badeværelset kunne der måles eksplosive koncentrationer af metan. Risten var placeret ca. 1,5 – 2 m over gulvet. Der kunne ligeledes måles eksplosive koncentrationer af metan i soveværelset, ligesom der var en tydelig lugt af lossepladsgas. Målinger foretaget i de øverste meter af jorden omkring bygningen viste et indhold af metan på 0-85 vol.%. Efterfølgende gasundersøgelser har ligeledes vist, at der var farlige koncentrationer af metan i jorden ved bygningen, således blev der målt ca. 55 vol.% metan og ca. 38 vol. % kuldioxid i en 2 m dyb boring umiddelbart op ad huset /23/. En måling udført i maj 1991 gennem udluftningsristen til badeværelset viste, at der fortsat kunne måles eksplosive koncentrationer af metan i badeværelset /23/. Ved en række tilfælde er der foretaget fluxkammer-målinger i området hvor bygningen tidligere var opført. Målingerne er udført af studerende ved DTU bl.a. /22/. Målingerne viser, at der sker en opsivning af metan i området, ved /22/ er der således målt en flux på ca. 0,001 Nm³/m²h (normal kubikmeter pr. kvadratmeter overflade pr. time).
Geologi	Lossepladsen er beliggende i en morænesandsbakke nord for Åmosen. Grundvandet står ca. 16-20 m u.t., der er således ca. 16-20 m umættet zone bestående hovedsageligt af groft sand og grus med tynde slirer af silt.
Atmosfæretryk	Da eksplosionen fandt sted, var der et meget kraftigt meteorologisk lavtryk, ligesom der var faldet megen nedbør et par dage før ulykken /22/. Dette har sandsynligvis forårsaget en trykgradient fra lossepladsen, hvilket har betydet, at store volumener af gas er sivet op i hulrum under trægulvet. Det er ikke blevet identificeret nøjagtigt, hvor gassen er kommet ind i bygningen, men det er hovedsageligt langs karme og gulvpaneler, der var tydelige tegn efter branden.

Vegetations skader	Et stort træ, der var placeret mellem huset med gasulykken og lossepladsen, var gået ud i 1990. Der er ligeledes tydelige tegn på misvækst på en mark syd for lossepladsen. Undersøgelser udført på marken bl.a. /22/og /24/ har vist, at der er høje koncentrationer af metan og kuldioxid i jorden i de områder, hvor der ses afgrødeskader.
Andre ulykker	I november 1990 skete en mindre ulykke, ligeledes om morgenen, da husets beboer ville tænde en cigaret. Ved ulykken blev et tyndt gardin svedent. Uheldigvis blev denne ulykke ikke anmeldt, hvorfor myndighederne ikke havde kendskab til ulykken før efter eksplosionsbranden i marts 1991.
Nærliggende bygninger	Nord for ulykkesejendommen, udfør den ældste affaldscelle, lå yderligere 4 huse mellem ca. 5 og 30 m fra lossepladsen. Tre af bygningerne er nu nedrevet, medens det sidste hus stadig er beboet, idet grundejerne ikke har ønsket at fraflytte huset. Undersøgelser i dette område har vist, at der sker gasudsivning også i dette område /23/, /24/.

5 Skadetyper

5.1 Indledning

I dette kapitel gennemgås de skadetyper, der har fundet sted, og sammenhængen med de tilhørende konsekvensklasser, som er beskrevet i bilag 3 kapitel 1.5. Skadetyperne opdeles i 5 konsekvensklasser, som vist i nedenstående tabel.

Tabel 5.1 Oversigt over "K"-værdier/konsekvensklasser og omfang af konsekvenserne

"K-værdi" Konsekvens- klasse	Omfang	Beskrivelse
0	Ingen konsekvenser	Hændelser, som ikke medfører farer.
1	Ubetydelige konsekvenser	Hændelser, der medfører mindre forstyrrelser, men ikke farer.
2	Mærkbare konsekvenser	Der er ikke tale om skader på personer eller miljø, men kun i mindre omfang skade på bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.
3	Betydelige konsekvenser	Der er mulighed for mindre alvorlige personskader og/eller betydelig beskadigelse af bygninger/bygværker på eller i nærheden af lossepladsen.
4	Alvorlige konsekvenser	Der mulighed for dødsfald eller varigt skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen.
5	Stor ulykke	Der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede blandt personer uden relation til lossepladsen.

I afsnit 0 er der på baggrund af de udsendte spørgeskemaer oplistet ca. 50 rapporteringer af hændelser, som har involveret lossepladsgasser.

For seks af ulykkerne er der ikke anført konsekvenser af hændelserne, heraf har fem hændelser fundet sted i Østrig. For disse anføres blot, at der har været gasindtrængen i boliger. Den sjette rapportering er fra Tjekki, som ikke har udleveret oplysninger om ulykker, men blot oplyst, at de har kendskab til ulykker.

I Kildare i Irland er der oplysninger om gasindtrængen i en beboelse, hvorfra familien er evakueret. Det er ikke oplyst, om evakueringen skyldes risiko for gasekspllosion eller blot skyldes gener.

Bortset fra disse lidt upræcise hændelser handler alle de øvrige hændelser om brand og/eller eksplosion. I Danmark er der kendskab til en bolig, hvor beboerne blev evakueret pga. gener forårsaget af lossepladsgas, men ellers vurderes det på baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, at det primært er hændelser, som involverer brand og eksplosion, der er de relevante skadestyper.

I det følgende er det forsøgt at kategoriserer skadetyperne fra afsnit 0 i de tilhørende konsekvensklasser. Oplysningerne i afsnit 0 er dog meget begrænsede, hvorfor nogle af kategoriseringerne kan være usikre.

5.2 Kategorisering af skadetyper

Konsekvensklasse 5

Konsekvensklasse 5 anvendes når der er mulighed for dødsfald eller varigt skadede personer i lossepladsens omgivelser. Med omgivelser menes traditionelt omgivelser uden for en virksomhed, dvs. at der kan forekomme dødsfald blandt personer, som ikke har nogen relation til lossepladsen. Af de 52 rapporteringer, der er nævnt i afsnit 0, falder minimum 4 hændelser i konsekvensklasse 5.

De fire ulykker har fundet sted i Loscoe i England, Skellingsted i Danmark, Hekimbaz i Tyrkiet og Schwechat i Østrig. Med undtagelse af ulykken i Tyrkiet, hvor en eksplosion i en losseplads medførte et affaldsskred ned over en slumbebyggelse, er der tale om indendørs brande eller eksplosioner i boliger udenfor lossepladsen.

En 5. ulykke fandt sted i Biella, Italien, hvor en landmand døde af de kvæstelser han fik, ved en gaseksplosion i en vandindvindingsbrønd ca. 100 m fra lossepladsen.

Hertil kommer ulykken i Colmar i Frankrig. Ved denne ulykke blev en bygning ødelagt ved en eksplosion. Dette er i sig selv en hændelse i konsekvensklasse 3, men hvis man skal fortage en risikovurdering, vil man være nødt til at vurdere den potentielle risiko som en konsekvensklasse 5, da der kunne have været mennesker til stede i bygningen.

Konsekvensklasse 4

Konsekvensklasse 4 anvendes ved konsekvenser, hvor der er mulighed for dødsfald eller varig skade blandt ansatte, der har en relation til lossepladsen.

I afsnit 0 er refereret en ulykke i Oslo i Norge, hvor en operatør blev såret pga. en eksplosion i lossepladsens operatørhus. Det er oplyst, at han modtog hospitalsbehandling og havde 3 måneders sygeorlov. På denne baggrund er det vurderet, at der kan være tale om varig skade af operatøren. Eksplosionen kan bl.a. have forårsaget varige høreskader o.a.

Ved Wien i Østrig har der været en eksplosion i en brønd, hvor en arbejdsmand omkom. Forudsat at manden arbejdede på lossepladsen er dette en hændelse i konsekvensklasse 4. Hvis manden/brønden ikke havde relation til lossepladsen, men f.eks. havde tilknytning til en anden virksomhed nær lossepladsen, ville denne hændelse i stedet for falde i konsekvensklasse 5, jævnfør hændelsen i Biella, Italien.

I afsnit 0 er der flere rapporteringer om hændelser, der involverer arbejdere. Disse hændelser er dog rapporteret gruppevis med andre typer hændelser, og er derfor svære at kategorisere præcist. Det vurderes dog, at der er ca. 14 hændelser i afsnit 0, der hører til i konsekvensklasse 4.

Konsekvensklasse 3

Mindre alvorlig personskader, som f.eks. skyldes antændelse af mindre gasmængder i det fri, vil være et typisk eksempel på konsekvenser fra hændelser på lossepladser, som kan placeres i konsekvensklasse 3. Betydelige beskadigelse af bygninger/bygværker i på eller i nærheden af lossepladsen.

Som for konsekvensklasse 4, er en del af disse hændelser rapporteret gruppevis og er svære at kategorisere. Det skønnes, at der er 15-25 hændelser i konsekvensklasse 3.

Ekspllosionen i sportshallen ved Fåborg, hvor en piloteringspæl blev ødelagt og en håndværker kom til skade, er et eksempel på en hændelse i denne konsekvensklasse. Udendørs brande og eksplosioner på lossepladser på Filippinerne og i Litauen, som gav anledning til ejendomsbeskadigelse henholdsvis sårede personer, er to andre eksempler på hændelser i konsekvensklasse 3.

Konsekvensklasse 1

Der er et enkelt eksempel på en hændelse, som kan kategoriseres i konsekvensklasse 1, ubetydelige konsekvenser, dvs. hændelser, der medfører mindre forstyrrelser, men ikke farer. Eksemplet er lossepladsen ved Tallin i Estland hvor brande forårsagede røg og luftforurening til gene for borgerne i Tallin.

5.3 Udvælgelse af relevante konsekvensklasser

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen vurderes det, at udendørs brande og ”eksplosioner” er de eneste konsekvenser, hvor konsekvensklasse 3 kan anvendes som den værst mulige konsekvens. Selvom flere af de indendørs hændelser afsnit 0 falder i konsekvensklasse 3, vurderes det, at der ved gasindtrængen til bygninger eller bygværker, hvor personer kan være til stede, vil være mulighed for brand eller eksplosion, som kan skade personer varigt eller medføre dødsfald.

Konsekvensklasse 4 og 5 skønnes derfor, at være de klasser, man oftest skal vurdere sikkerhedsniveauet for.

Konsekvensklasse 3 kan anvendes ved risikovurdering af aktiviteter i det fri på lossepladser, f.eks. gravearbejde eller ved risikovurdering af bygninger/bygværker, hvor der ikke kommer mennesker.

Det er muligt, at der også forekommer mindre ulykker og gener, men at disse hændelser ikke rangerer så højt i folks bevidsthed, og derfor ikke er blevet registreret eller meldt ind som svar på spørgeskemaundersøgelsen. Risikovurdering af gener kan evt. komme på tale, men vil i en vis udstrækning være dækket af en risikoanalyse af brand- og eksplosionsfare.

6 Referencer

- /1/ Gas I danske lossepladser. Status for amternes arbejde, 1993. DAVID, Dansk Amtsvandingeniørforening, januar 1994.
- /2/ Forprojekt. Risikovurdering ved gaslossepladser. Miljøstyrelsen August 1998.
- /3/ Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M., Ledrut-Damanet, M.-J., Nyns, E.-J., Willumsen, H.-C., Butson, J., Fabry, R. og Ferrero, G.-L.. Landfill gas - From environment to energy. Comission of the European Communities. 1992.
- /4/ Franklin, Jerome D. and Vetter, Robert J. Emergency Response to Landfill Gas Migration. Public Works for May, 1987.
- /5/ Williams, G.M. and Aitkenhead, N. Lessons from Loscoe: The uncontrolled migration of landfill gas. Quarterly Journal of Engineering Geology, 24, 191-207.
- /6/ Kjeldsen, P. Gasproduktionen i lossepladser – Spredning og risici. Indlæg v. ATV-Komitéens møde om Gas i lossepladser, Marts 1993.
- /7/ Thomas, S. and Salmon, P. Lateral Migration of Biogas in an old Landfill Site. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 11-15 October 1993.
- /8/ Landfill Gas, a technical memorandum providing guidance on the monitoring and control of landfill gas. Waste Management Paper no. 27. Department of the Environment 1991.
- /9/ Risk Assessment for methane and other gases from the ground. CIRIA Report 152. 1995.
- /10/ Environment Canada Guidance Document for Landfill Gas Management. Made by Conestoga-Rovers & Associates Limited for Waste Treatment Division, Hazardous Waste Branch, Environmental Canada. EPS 2/UP/5e. March 1996.
- /11/ M.E. Nosanov (Lossepladsekspert fra Californien), personlig kommunikation (se iøvrigt <http://maxpages.com/menosanov>) april 2000.
- /12/ United States Environmental Protection Agency: Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), Subtitle D. 1991.
- /13/ Geswein, A.J. Memorandum on Landfill Gas Monitoring Requirements for MSWLFs. USEPA Home page (www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/rev-rule/gas.txt).

- /14/ Crissman, P., North Carolina State Waste Management Division, Raleigh, NC, USA, Personlig kommunikation, December 1999.
- /15/ Jesnick, C., North Carolina State Superfund Site Office, Raleigh, NC, USA, Personlig kommunikation, December 1999.
- /16/ Ontario Ministry of the Environment Landfill Standards – A Guidance on the Regulatory and Approval Requirements for New or Expanding Landfilling Sites. ISBN 0-7778-7568-3. May 1998.
- /17/ Ontario Ministry of the Environment Procedure D-4-1: assessing Metane Hazards from Landfill Sites. November 1987.
- /18/ Larry Wilcox, Ontario Ministry of the Environment, Waste Management Policy Branch. Personlig kommunikation. Maj 2000.
- /19/ Claude Trudell, Quebec ministere de l'environnement, Service de la gestion des résidus solides. Personlig kommunikation. Maj 2000.
- /20/ Metane: Its Occurrence and Hazards in Construction. CIRIA Report 130. British Geological Survey. 1993.
- /21/ Jarre, P. et al. Lessons to be Learned from a Fatal Landfill Gas Explosion. Sixth International Landfill Symposium. Sardinia 1997. Proceedings Volume II, p. 541-547.
- /22/ Fischer, E.V. Lossepladsgas. Transport og produktion, feltundersøgelser af Skellingsted Losseplads. Eksamensprojekt, Laboratoriet for Teknisk Hygiejne, DTH, 1992.
- /23/ Undersøgelser af gasudsivning fra Skellingsted Losseplads samt vurdering af eksplosionsrisiko ved nærliggende bebyggelse. Notat udarbejdet af Ranbøll & Hannemann A/S for Vestsjællands Amt. 18-07-1991.
- /24/ Christophersen M. Lateral spredning og emission af gas fra en gammel losseplads. PhD afhandling. Instituttet for Miljøteknologi. 28 april 2000