

Grindsted gamle losseplads

– en sammenfatning af DTU's forskningsresultater



Poul L. Bjerg og Peter Kjeldsen
DTU Miljø, september 2010

Grindsted gamle losseplads

Sammenfatning af DTU's forskningsresultater

Et samarbejdsprojekt mellem
DTU Miljø og Region Syddanmark

Udarbejdet af:

Poul L. Bjerg

Peter Kjeldsen

DTU Miljø

Danmarks Tekniske Universitet

**Rapport udarbejdet for Region Syddanmark
September 2010**

Grindsted gamle losseplads

Sammenfatning af DTU's forskningsresultater

Forfattere: Poul L. Bjerg og Peter Kjeldsen
Font: Garamond
Grafik: Forfatterne, Birthe Brejl og Torben Dolin
Omslag: Lisbet Brusendorff

ISBN 978-87-91855-77-1

DTU Miljø
Institut for Vand og Miljøteknologi
Danmarks Tekniske Universitet
Miljøvej, B113, DK-2800 Kgs. Lyngby
Tlf: (+45) 45251600
Fax: (+45) 45932850

Publikationen kan downloades på: www.sara.env.dk

Forord

Denne rapport er udarbejdet i perioden november 2008 – december 2009 for Region Syddanmark. Formålet med rapporten er at skabe et grundlag for at kunne igangsætte omkostningseffektive, yderligere undersøgelser omkring Grindsted gamle losseplads og udføre en risikovurdering for at belyse den gamle losseplads rolle i forureningssituationen i og omkring Grindsted by. Rapporten baserer sig på en detaljeret analyse af omkring 35 publikationer alle omhandlende grundvandsforureningen ved Grindsted gamle losseplads. Rapporten er udarbejdet af to forskere, der virkede som projektledere på de mange forskningsprojekter, som blev gennemført i 90'erne.

Der rettes en tak til Grete Hansen, DTU Miljø, for hjælp med at samle de mange publikationer og til Torben Dolin for grafisk arbejde.

I Region Syddanmark har Mette Christophersen og Jørn K. Pedersen bidraget med kritisk gennemlæsning af udkast til rapporten.

Poul L. Bjerg
Peter Kjeldsen

Kgs. Lyngby, september 2010

Sammenfatning

Danmarks Tekniske Universitet (DTU) gennemførte i perioden 1991-98 flere større forskningsprojekter med henblik på at belyse grundvandsforureningen fra en dansk losseplads og den naturlige nedbrydning af væsentlige forureningskomponenter i grundvandszonen. Projekterne blev gennemført med Grindsted gamle losseplads som udgangspunkt.

Formålet med rapporten er at skabe et grundlag for at kunne igangsætte omkostnings-effektive, yderligere undersøgelser omkring Grindsted gamle losseplads og udføre en risikovurdering for at belyse den gamle losseplads rolle i forureningsituationen i og omkring Grindsted by. Dette gøres ved at sammenfatte alle DTU's resultater fra undersøgelserne på Grindsted gamle losseplads samt på basis af denne sammenfatning at give en fremadrettet anbefaling af, hvad Region Syddanmark bør fokusere på i det videre arbejde med at kortlægge risikoen relateret til forureningen fra lossepladsen.

Grindsted gamle losseplads er anlagt ovenpå den oprindelige jordoverflade i et område cirka 1 km sydvest for Grindsted by. Lossepladsen, der er opfyldt fra 30'erne og frem til slutningen af 70'erne, har et areal på 10 hektar, og den indeholder omkring 300.000 tons affald. Lossepladsen modtog primært husholdningsaffald, spildevands-slam og industriaffald – herunder kemikalieaffald.

Kemikalieaffaldet – langt overvejende hidrørende fra det tidligere Grindstedværk - er primært koncentreret i et cirka 1-2 hektar stort specialdepot. Depotet indeholder store mængder organiske kemikalier i form af aromatiske opløsningsmidler, klorerede opløsningsmidler og farmaceutiske stoffer. Kemikalierne er deponeret på en form, som vil resultere i udsivning med høje stoffkoncentrationer i adskillige århundreder, hvis der ikke gennemføres afværgetiltag mod kilden. Udsivningen har dannet en bred forureningsfane i det terrænnære grundvandsmagasin med høje udgangskoncentrationer af mange af de deponerede kemikalier – herunder nedbrydningsprodukter fra kemikalierne. Det vides ikke, hvor langt væk fra depotet eller hvor dybt denne forureningsfane strækker sig.

Nedsivningsforholdene under og omkring lossepladsen har resulteret i, at en del af det udsivende vand har bevæget sig relativt dybt ned i de grundvandsførende lag. Da de gennemførte undersøgelser primært havde sigte mod at undersøge den naturlige nedbrydning i det terrænnære magasin, kan der ikke gives et konklusivt svar på, i hvor stort omfang de dybere grundvandsmagasiner er berørt af forureningsudsivningen fra lossepladsen.

Undersøgelserne i det terrænnære grundvandsmagasin var især fokuseret på en forureningsfane hidrørende fra den del af lossepladsen, som indeholdt almindeligt husholdningsaffald iblandet en mindre del kemikalieaffald. Her sås en væsentlig naturlig nedbrydning, som resulterede i, at kemikalierne kun blev fundet i grundvandet i op til et par hundrede meters afstand fra lossepladsen.

På basis af de gennemførte undersøgelser konkluderes det, at der kan være risiko for påvirkning af grundvandet i større dybder samt en påvirkning af den nærliggende Grindsted å. Der forventes derimod ikke at være risiko for indeklimaet i nærliggende bygninger. Det anbefales at gennemføre supplerende undersøgelser i form af nye, dybe borer til belysning af forureningsfanens udstrækning (især længde og dybde) samt borer til belysning af forureningens opstrømning til Grindsted å.

Indholdsfortegnelse

FORORD	1
SAMMENFATNING	3
INDHOLDSFORTEGNELSE	5
1 INTRODUCTION	7
1.1 Baggrund	7
1.2 Formål	7
1.3 Rapportens opbygning og indhold	7
2 GRINDSTED GAMLE LOSSEPLADS – HISTORIK	8
3 UDVASKNING FRA AFFALDET	10
3.1 Karakterisering af kemikalieaffaldet	10
3.2 Udvaskningsforhold	10
4 GEOLOGI	12
4.1 Geologisk beskrivelse på stor skala	12
4.2 Geologisk beskrivelse for nærområde ved lossepladsen	12
5 HYDROGEOLOGI OG STRØMNINGSFORHOLD	14
5.1 Potentialeforhold ved Grindsted gamle losseplads	14
5.2 Lokale potentialeforhold i nærområdet	15
5.3 Vertikale gradienter i magasinet	17
5.4 Hydraulisk ledningsevne og strømningshastigheder	17
6 PERKOLATKARAKTERISERING OG UDSTRØMNING	19
6.1 Perkolatkarakterisering – arealmæssig variation	19
6.2 Udstrømning af perkolat fra lossepladsen	20
6.3 Perkolatets lodrette bevægelse	22
6.4 Afgasning til umættet zone	23
7 NATURLIG NEDBRYDNING I GRUNDVANDET	24
7.1 Grundvandskvalitet af øvre grundvand	24
7.2 Uorganisk fane og redoxforhold	25
7.3 Skæbne af forureningsfanen i det øvre grundvandsmagasin	26
7.4 Forureningsfane i nedre grundvandsmagasin	30
8 KONCEPTUEL SPREDNINGSMODEL OG POTENTIELLE RISICI	32
8.1 Konceptuel model	32
8.2 Potentielle risici	34
9 HVAD VED VI – OG HVAD VED VI IKKE?	37

10	FORSLAG TIL YDERLIGERE UNDERSØGELSER	38
10.1	Kort sigt	38
10.2	Større indsats	38
11	REFERENCER	40

Bilag 1 Litteratur om Grindsted gammel losseplads udarbejdet af Danmarks Tekniske
Universitet – Alfabetisk liste

1 Introduktion

1.1 Baggrund

Region Syddanmark står overfor et betydeligt arbejde med at kortlægge de mange forureningstrusler, som findes i Grindsted by og omegn. Dette arbejde bør baseres på et godt overblik over tidligere undersøgelser og opnåede erkendelser.

Danmarks Tekniske Universitet gennemførte i perioden 1991-98 flere større forskningsprojekter støttet af EU og de danske forskningsråd. Projekterne havde overordnet til formål at studere grundvandsforureningen fra en dansk losseplads samt den naturlige nedbrydning af væsentlige forureningskomponenter i grundvandszonen. Grindsted gamle losseplads blev udvalgt som lokalitet for forskningsprojekterne. Grindsted gamle losseplads er kendetegnet ved at være sammensat af en mere traditionel losseplads, som modtog det omkringliggende samfunds almindelige affaldstyper (dagrenovation, bygnings- og industriaffald mm), og et decideret kemikalieaffaldsdepot, som modtog procesaffald fra Grindstedværket. Store dele af projektets aktiviteter havde fokus på perkolatpåvirkningen af det terrænnære grundvandsmagasin hidrørende fra den traditionelle del af lossepladsen – kun de kildekarakteriserende aktiviteter fokuserede på kemikalieaffaldsdepotet.

De mange aktiviteter er afrapporteret i en lang række engelsksprogede artikler, i PhD-afhandlinger og eksamensprojekter, som udkom i perioden 1993-2000 (se bilag 1 for en fuldstændig liste). Efterfølgende blev der i 2006 igangsat begrænsede aktiviteter som led i et PhD-studium gennemført af en gæsteforsker på DTU. Dette arbejde havde primært til formål at belyse kildestyrken af nogle af de vigtige stoffer, som ikke indgik i de oprindelige aktiviteter. Resultaterne af disse aktiviteter vil også indgå i denne sammenfatning.

1.2 Formål

Formålet med rapporten er at skabe et grundlag for at kunne igangsætte omkostnings-effektive, yderligere undersøgelser omkring Grindsted gamle losseplads og udføre en risikovurdering for at belyse den gamle losseplads rolle i forureningsituationen i og omkring Grindsted by. Dette gøres ved at sammenfatte alle DTU's resultater fra undersøgelserne på Grindsted gamle losseplads samt på basis af denne sammenfatning at give en fremadrettet anbefaling af, hvad Region Syddanmark bør fokusere på i det videre arbejde med at kortlægge risikoen relateret til forureningen fra lossepladsen.

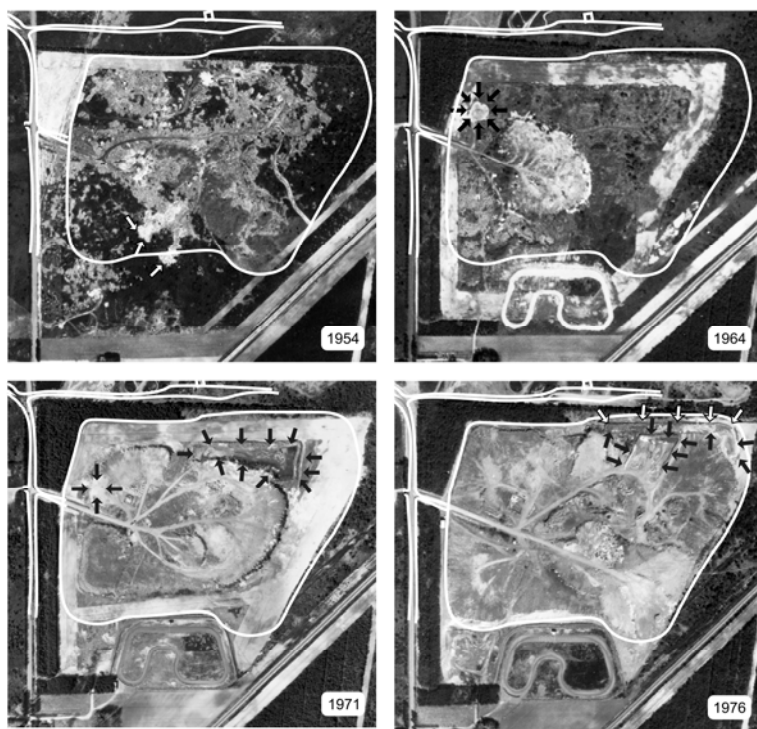
1.3 Rapportens opbygning og indhold

Rapporten indeholder i alt 10 kapitler, hvoraf kapitlerne 2-7 gennemgår de forskellige undersøgelser og de opnåede resultater med fokus på selve lossepladsen og det perkolatpåvirkede grundvandsmagasin nedstrøms lossepladsen. I kapitlerne 8-9 gives en tolkning af de opnåede resultater i form af forventede konceptuelle spredningsmodeller, potentielle forureningsrisici og en vurdering af vidensniveauet. I kapitel 10 giver vi vores forslag til yderligere undersøgelser, som er nødvendige for at fastlægge mulige forureningsrisici i tilknytning til Grindsted gamle losseplads.

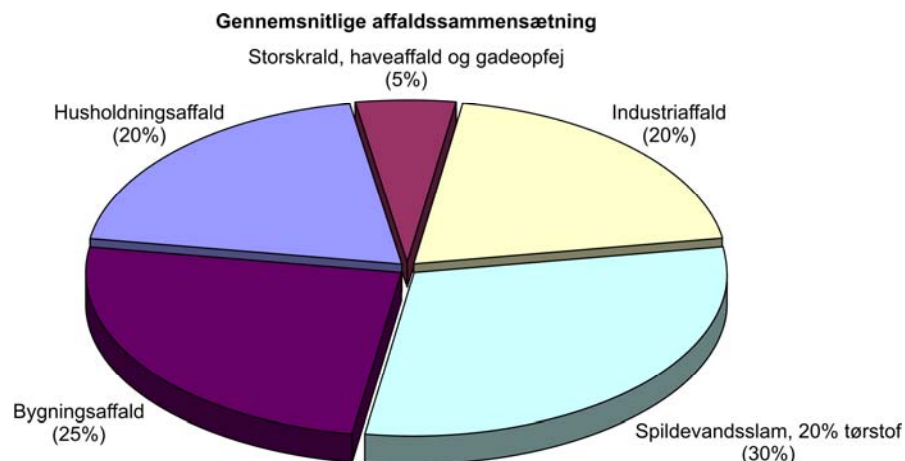
2 Grindsted gamle losseplads – historik

Grindsted gamle Losseplads er anlagt ovenpå den oprindelige jordoverflade i et område cirka 1 km sydvest for Grindsted by. Årsagen til at netop dette areal blev opfyldt er ukendt. Gamle målebordsblade indikerer at den østlige-centrale del af lossepladsarealet har været vandlidende og kan være årsagen til lossepladsers placering. Opfyldningen begyndte så småt i 1930'erne og fortsatte op i 1970'erne med officiel afslutning i 1977. Opmålinger af flyfotos tyder dog på, at deponeringsaktiviteterne fortsatte efter dette år – dog formentlig primært jordopfyldning ovenpå det deponerede affald. Arealet af Grindsted gamle losseplads er omkring 10 hektar. På basis af opgørelser af dannet affald i optagsområdet er den samlede deponerede affaldsmængde estimeret til omkring 300.000 tons¹.

Indtil 1973 var deponeringsaktiviteterne usystematiske, og der var ingen opsyn. Fra 1973 blev affaldet kompakteret, og der blev benyttet daglig afdækning i form af sandjord. Slam – herunder ret tyndtflydende slam - fra Grindstedværket blev i årenes løb deponeret i gruber, som i starten (frem til 1972-1973) blev udgravet i de oprindelige sandede jordlag, og senere etableret ovenpå deponeret affald. Udgravningerne blev omkranset af jordvolde for at udgå ukontrolleret afløb af det tyndtflydende affald ud i de omkringliggende arealer. Udviklingen i affaldsdeponeringerne – herunder placeringen af Grindstedværkets slamdepoter - kan ses på figur 2.1¹. Heraf fremgår det, at Grindstedværkets deponeringer primært er sket i den nordlige del af deponeringsområdet i et område med et areal på 1-2 hektar.



Figur 2.1 Flyfotos af lossepladsarealet fra årene 1954, 1964, 1971 og 1976. Det endelige omrids af lossepladsen er vist på alle fire fotos. Beliggenheden af gruberne er vist med sorte eller hvide pile¹.



Figur 2.2 Den gennemsnitlige sammensætning af affaldet deponeret på Grindsted gamle losseplads¹.

Lossepladsen har modtaget flere affaldstyper udover procesaffaldet fra Grindstedværket, som vist på figur 2.2. Mængden af industriaffald fra Grindstedværket var 9000 tons i 1969 faldende til 1700 tons i 1973. Dette affald var mere eller mindre flydende, og for en stor del bestod det af rester fra de forskellige produktionslinier for farmaceutiske stoffer, hvoraf barbiturater (aktivstoffer i sovepiller) og sulfonamider (aktivstoffer i antibiotiske lægemidler) var de stoffer, som blev produceret i størst mængde. Flere organiske opløsningsmidler blev anvendt som ekstraktionsmidler for de ønskede aktivstoffer, og der brugtes også aktivt kul til fjernelse af uønskede stoffer, som bl.a. gav misfarvning af aktivstofferne. En væsentlig del af tørstoffet i det flydende og viskøse affald, som blev deponeret i gruberne, udgjordes af aktivt kul med et højt indhold af organiske opløsningsmidler. Der blev både anvendt aromatiske opløsningsmidler som benzen, toluen og xylene, klorerede stoffer som perklorethylen (PCE) - og formentlig også andre klorerede opløsningsmidler.

3 Udvasning fra affaldet

3.1 Karakterisering af kemikalieaffaldet

På basis af de historiske undersøgelser (se kapitel 2) og udførte perkolatboringer (præsenteres i kapitel 6) afgrænsedes det forventede område, hvor Grindstedværkets kemikalieaffald var deponeret. Der blev herefter i 1993-94 ved brug af en snegleborerig udtaget affaldsprøver fra ni lokaliteter indenfor ”hot spot”-området. Der blev taget prøver fra 2-5 meter under terræn^{2,3,4,5}. Det udtagne affald fremstod som et meget (visuelt) homogent, sort, finkornet materiale. Der blev sideløbende udtaget uforstyrrede affaldsprøver med kerneprøvetager for at måle affaldets hydrauliske ledningsevne i laboratoriet. I 2005 blev der – på DTUs initiativ – iværksat en mindre undersøgelse, hvor den samme kerneprøvetager blev benyttet til udtagning af et mindre antal nye affaldsprøver til vurdering af indhold af stoffer, som ikke blev analyseret i de første undersøgelser⁶.

Analyse af prøverne fra undersøgelserne i 93-94 viste et relativt højt vandindhold (fra 37-56% på tørstof basis) og en høj andel af organisk kulstof (typisk 17-52 % på tørstof basis)⁵. Det høje indhold af organisk kulstof blev tolket som resulterende fra affaldets primære stofindhold, nemlig aktivt kul (som også gav den dyb-sort farve). Prøverne blev desuden analyseret for BTEX. Her fandtes store variationer i BTEX-indholdet fra prøve til prøve. Toluen var det BTEX-stof, som fandtes i højeste koncentrationer – helt op til 73 g/kg tørstof⁵.

Fra de dybdespecifikke affaldsprøver udtaget i 2005 blev der lavet blandeprøver. Der blev fokuseret på en lokalitet, hvor der i udtagne underliggende grundvandsprøver var fundet høje koncentrationer af sulfonamider (11 forskellige stoffer) og barbiturater (5 forskellige stoffer) og også høje koncentrationer af klorerede stoffer (PCE, TCE, DCE og vinylklorid) – se kapitel 6. I området med højt identificeret indhold i grundvandet fandtes for sulfonamider og barbiturater affaldskoncentrationer mellem 35-2400 µg/kg tørstof samt koncentrationer af PCE og TCE på henholdsvis 37 og 290 µg/kg tørstof. Der blev også identificeret indhold af DCEer (50-350 µg/kg tørstof) og vinylklorid (340 µg/kg tørstof), hvilket indikerer, at der foregår dekloreringsprocesser i affaldslagene⁶.

På prøver udtaget med kerneprøvetageren blev affaldets hydrauliske ledningsevne bestemt i laboratoriet. Der blev fundet værdier i intervallet $1-8 \cdot 10^{-7}$ m/s⁵. På grund af affaldets fine tekstur kan det forventes, at affaldet vil være tæt på vandmættet. Hvis der således forudsættes en gradient på én, giver dette en Darcy hastighed på 14 m/år. Dette indikerer, at affaldslagene med lethed vil kunne gennemstrømmes af en typisk nettonedbør på 400 mm/år. Ved kraftige regnskyl kan der dog ske vandstrømning i det skrånende jordlag, som er beliggende ovenpå affaldslagene. Dette blev eftervist ved et eksamensprojekt⁷.

3.2 Udvasningsforhold

Da man fandt høje indhold af organisk kulstof i affaldsprøverne primært hidrørende fra det høje indhold af aktivt kul, blev der lavet en omfattende undersøgelse af affaldets udvasningsforhold. Der blev lavet et antal udvasningstest, hvor affaldsprøverne blev udrustet med rent vand med det formål at bestemme typiske koncentrationer i udvasningsvandet og bestemme udvasningskarakteristika i form af fordelingskoefficienter for BTEX-stofferne, som beskriver affaldets evne til at sorbere BTEX-

stofferne. På basis af de fundne fordelingskoefficienter (for toluen: 500-1000 L/kg), affaldslagernes tykkelse (4 meter) og porøsitet (0,67), samt mængden af nettonedbør (400 mm/år), som forventes at gennemstrømme affaldslagene, blev den nødvendige udvaskningstid (for at udvaske hele mængden af toluen fra affaldslagene) estimeret til i størrelsesordenen 5.000-10.000 år⁵. Udvasningen af de i affaldet indeholdte stoffer kan således forventes at forløbe med uformindsket styrke i tusindvis af år!

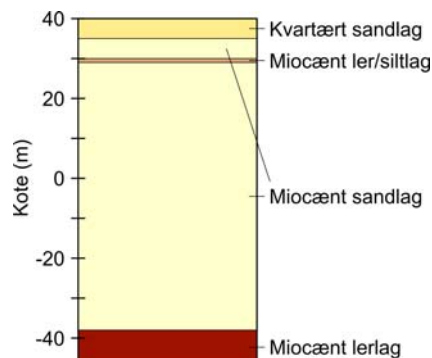
4 Geologi

De geologiske forhold i området er oprindeligt beskrevet i forbindelse med de første undersøgelser af lossepladsen foretaget af to rådgivende ingeniørfirmaer i perioden 1986-89⁹. Siden er der i flere omgange suppleret med mere detaljerede beskrivelser af de lokale forhold og med særlig vægt på de øvre 10-15 m. En detaljeret beskrivelse af geologien i nærområdet er opstillet af Peter Gravesen, GEUS¹⁰. I modellen er inddraget geologiske beskrivelser fra 185 sedimentprøver samt slug test og gammalogs fra 19 rammeboringer.

4.1 Geologisk beskrivelse på stor skala

Grindsted gamle losseplads er beliggende vest for hovedstilsandslinien under Weichsel istiden. Smeltevandsaflejringer var afsat under isens tilbagetrækning. Tykkelsen af de kvartære sandlag er 5 til 15 m afhængig af terrænkoter og erosionsforhold. Floder eroderede under afsmeltningen ned i den underliggende tertiære, miocæne lagserie. Den tertiære lagserie er aflejret i et delta system med små floder og søer. Tykkelsen er mere end 100 m.

Kendskabet til denne lagserie på større skala og i større dybde omkring lossepladsen er stort set baseret på de fire oprindelige boringer GLU1-GLU4 (DGU114.1384, DGU114.1453-1455). En foresimplet lagserie er beskrevet i figur 4.1. Nedadtil er akviferen afgrænset af et regionalt miocænt lerlag ca. 70-80 m under terræn (Øvre Arnum formationen¹¹). Lagserien er præget af vekslende sandlag gennemskåret af tynde brunkulslag. Det miocæne sandlag tilhører Odderup formationen¹¹. Brunkulslagene har muligvis betydning som horisontale barrierer og kan korreleres mellem GLU boringerne (syd-nord). Der er opstillet en flow- og stoftransportmodel⁹, hvor den tertiære lagserie er opdelt i flere lag.



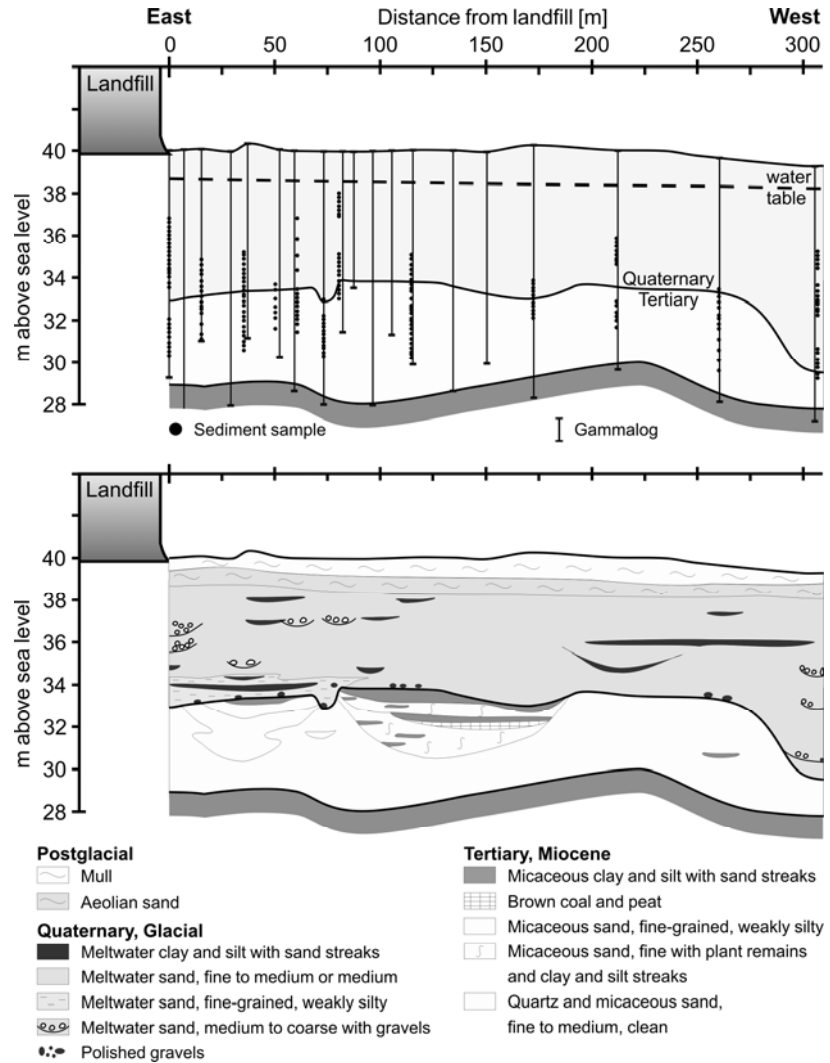
Figur 4.1 Geologisk lagserie for området ved Grindsted gamle losseplads⁹

4.2 Geologisk beskrivelse for nærområde ved lossepladsen

En geologisk model for nærområdet ved lossepladsens vestkant er vist i figur 4.2. Der er 3 betydende lag inden et mere sammenhængende miocænt ler/siltlag træffes ca. 10-15 m under terræn. Øverst findes et kvartært sandlag (5-6 m under terræn), som er fulgt af et miocænt sandlag til ca. 12 m under terræn (Odderup formationen). Der er lokalt et lerlag mellem disse sandlag. Denne lagserie genfindes i alle GLU boringerne og i et langsgående transekt i strømningsretning nedstrøms lossepladsen. Det skal dog

bemærkes, at der ikke er konstateret et lerlag i GLU 1 10-15 m under terræn. De få undersøgelser opstrøms lossepladsen peger på, at geologien kan veksle i området.

Det er af væsentlig betydning for flow og stoftransport, hvor silt- og lerlag ca. 10-15 m under terræn findes i området. Det er sandsynligvis sammenhængende i større områder, men der er ikke borningsoplysninger, som kan afklare dette endeligt.



Figur 4.2 Geologisk model for nærområdet ved lossepladsens vestkant. Placeringen af længdesnittet svarer til transekt I på figur 7.1¹⁰.

5 Hydrogeologi og strømningsforhold

Hydrogeologien på større skala er fastlagt på baggrund af undersøgelser og modellering i 1988-89^{8,9}. Dette er i 1992-1994 suppleret med ca. 200 pejleboringer til det øvre magasin. Der har desuden været foretaget kontinuert monitorering af grundvandspejl i udvalgte boringer for bl.a. at belyse de vertikale gradientforhold.

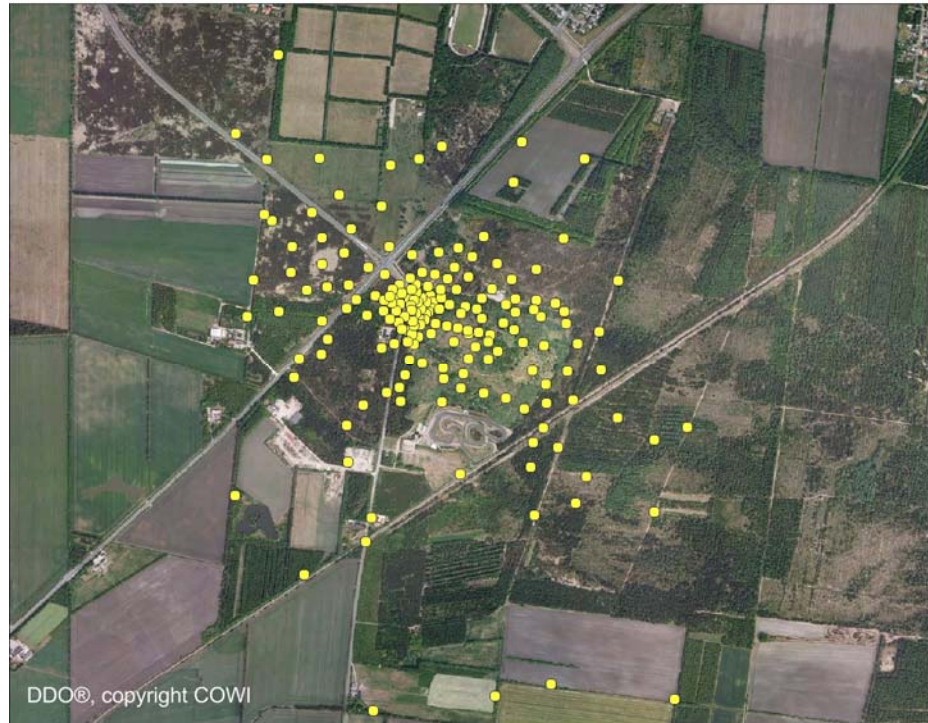
Hydraulisk ledningsevne er bestemt ved slugtest i en række boringer i flere undersøgelser, samt ved prøvepumpning¹². Hydrauliske ledningsevner bestemt i GLU-boringerne er indarbejdet i det oprindelige modelarbejde fra 1989. Nyere målinger er indarbejdet i senere modelopsætninger for lossepladsområdet (areal 550 m²·1150 m)¹³. Dette arbejde er suppleret med modellering af flow og reaktiv stoftransport i et langsående transekt nedstrøms lossepladsen¹⁴.

5.1 Potentialeforhold ved Grindsted gamle losseplads

Strømningsforholdene på større skala viser entydigt en nordvestlig strømning fra lossepladsen mod Grindsted Å. I modelleringen fra 1989 er der vist en sammenligning mellem forureningsfanen i det øvre sandlag og det dybere sandlag. Der er ikke signifikant forskel på stofudbredelsen. Det overordnede potentiale for det øvre sandlag (10-15 m) er langt bedre beskrevet¹⁵ end forholdene i det dybere sandlag.

I et ca. 1000·1500 m område omkring lossepladsen er der etableret et omfattende net af pejleboringer, som i perioden december 1992 til april 1995 blev pejlet ca. 4 gange årligt (Figur 5.1). På større skala var variationerne i strømningens retning meget små, mens der lokalt omkring lossepladsen var betydelige variationer (se afsnit 5.2). Afstand til grundvandspejlet var 1-3 m. Den gennemsnitlige hydrauliske gradient i området var 0,0012 m/m. Den årlige variation i grundvandspejlet var 1-2 m.

De vertikale gradienter mellem det øvre sandlag (0-12 m under terræn) og det nedre sandlag (under 12 m under terræn) er nedadrettet (0,05-0,5 m). I det nedre sandlag giver de gennemgående brunkulslag anledning til mindre potentialeforskelle. Det er påvist i 1989, at der er en kraftig opadrettet gradient (ca. 1,3-1,6 m) ved en dyb boring GIX på nordsiden af Grindsted Å⁹. Dette kunne afspejle, at der sker en afdræning af forureningsfanen op i åen på den side. Der er ingen boringer tæt på åen ved sydsiden af åen.

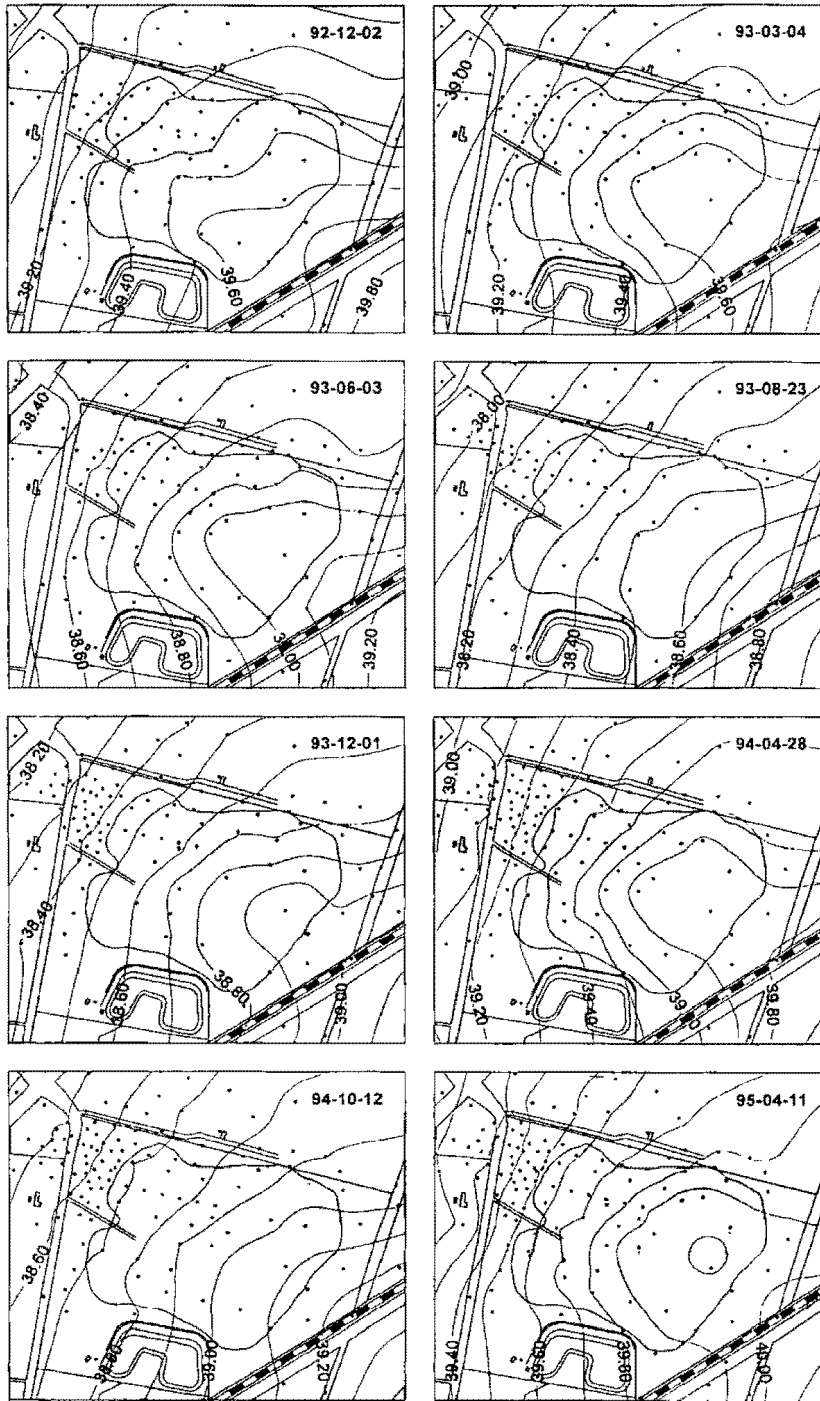


Figur 5.1 Pejleboringer i området ved Grindsted gamle losseplads.

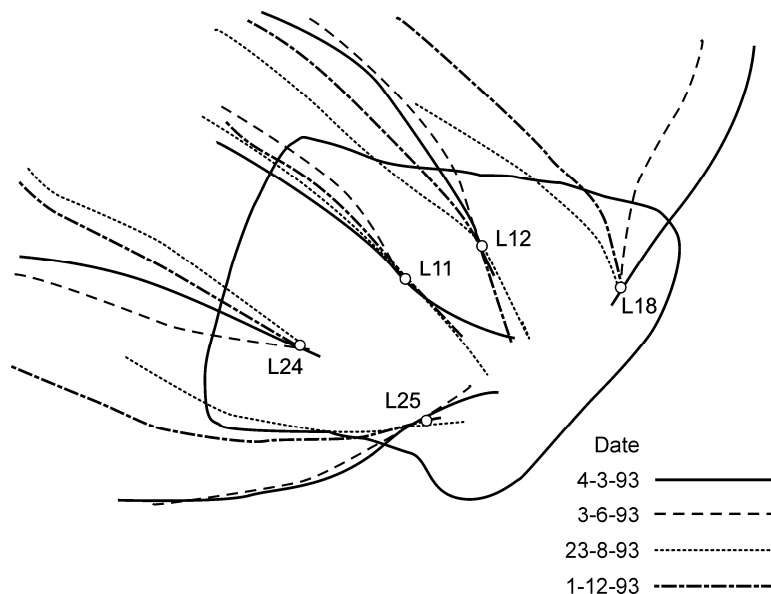
5.2 Lokale potentialeforhold i nærområdet

De lokale potentiale forhold i nærområdet af Grindsted gamle losseplads var genstand for speciel opmærksomhed¹⁵. På basis af ca. 70 pejleboringer i den umiddelbare nærhed af lossepladsen og de ca. 30 perkolatboringer, som blev boret gennem affaldet (se afsnit 6), blev der i perioden december 1992 til april 1995 gennemført pejlinger ialt otte gange. Resultatet i form af isopotentialekort for de otte målerunder er vist på figur 5.2. Figuren viser kraftige sæsonvariationer i potentialebilledet med væsentlige ændringer i lokale strømningsretninger hen over året. Dette er illustreret i figur 5.3, som viser estimerede strømmlinier som funktion af årstid og sted på lossepladsen. For især lossepladsens nordøstlige del ses en variation på næsten 90 grader mellem strømmlinierne. Lignende forhold – dog mindre udtalt ses i lossepladsens sydlige del, mens der ikke er store sæsonmæssige ændringer i strømmlinier udgående fra midten af lossepladsen. Dette forhold vil lede til en væsentlig større sideværts spredning af forureningsfanen i grundvandet, end hvis der ikke observeredes den udtalte sæsonvariation i strømningsmønstret.

Figur 5.2 viser også, at der om vinteren etablerer sig et vandskel på den nedstrøms side af lossepladsen, således at grundvand strømmende mod lossepladsen fra sydøst vil strømme udenom lossepladsområdet – der ses endda tendenser til modsat rettede gradienter (f.eks på datoen 95-04-11). Tilstedeværelse af et sådant vandskel forventes at lede til større nedadrettede gradienter under lossepladsen.



Figur 5.2 Resultatet af otte pejlerunder gennemført på forskellige tidspunkter på året i perioden december 1992 til april 1995¹⁵.



Figur 5.3 Estimerede strømmlinier på basis af potentialekort vist i figur 5.2¹⁵.

Sammenholdt med de høje perkolatkoncentrationer i ”hot spot”-området (se afsnit 6), som vil lede til forhøjede densiteter af perkolatet, kan der forventes større tendens til nedsynkning af perkolatfanen under lossepladsen.

Årsagerne til de udtalte sæsonvariationer i strømningmønsteret omkring lossepladsen er indgående diskuteret andensteds¹⁵. En plausible årsag kan være en kombination af uens fordelt infiltration (størst infiltration i lossepladsens rand) i kombination med reduceret hydrauliske ledningsevne af akvifer-materiale under lossepladsen (dannelse af bakteriefilm, gasbobler og udfældningsprodukter – alle som resultat af perkolatets tilstedeværelse). En lavere hydraulisk ledningsevne kan også være geologisk betinget og kan have været årsagen til, at en del af arealet var vandlidende før, lossepladsen blev etableret.

5.3 Vertikale gradienter i magasinet

De vertikale gradienter er entydigt nedadrettede lokalt. Der er gennemført en detaljeret monitorering af gradientforholdene i det øvre magasin og mellem det øvre magasin og det nedre magasin nedstrøms lossepladsen^{12,14,16}. Observationerne bekræftede det regionale billede af potentialeforholdene og afslørede, at de inhomogeniteter, der er observeret i nærområdet, kan påvirke den vertikale stofudbredelse.

5.4 Hydraulisk ledningsevne og strømningshastigheder

De bedste bud på hydrauliske parametre for de betydende geologiske lag er sammenfattet i tabel 5.1¹⁴. Parametrene har størst troværdighed for de øvre lag (indtil 12 m under terræn), mens der er betydelig usikkerhed om parameterværdier i det nedre tertiære sandlag. Strømningshastighederne i det kvartære sandlag er ca. 50 m pr. år nedstrøms lossepladsen, mens strømningshastigheden i det tertiære sandlag (stadig øvre grundvandsmagasin) er ca. 10 m/år. Strømningshastigheden i det nedre tertiære magasin er meget usikker¹³, og der opnås urealistiske parameterværdier for dette lag ved inverts modellering både i 2D og 3D¹³. I det oprindelige modelleringsarbejde er der anvendt en værdi på ca. 200 m/år for strømningshastigheden i det nedre magasin⁹.

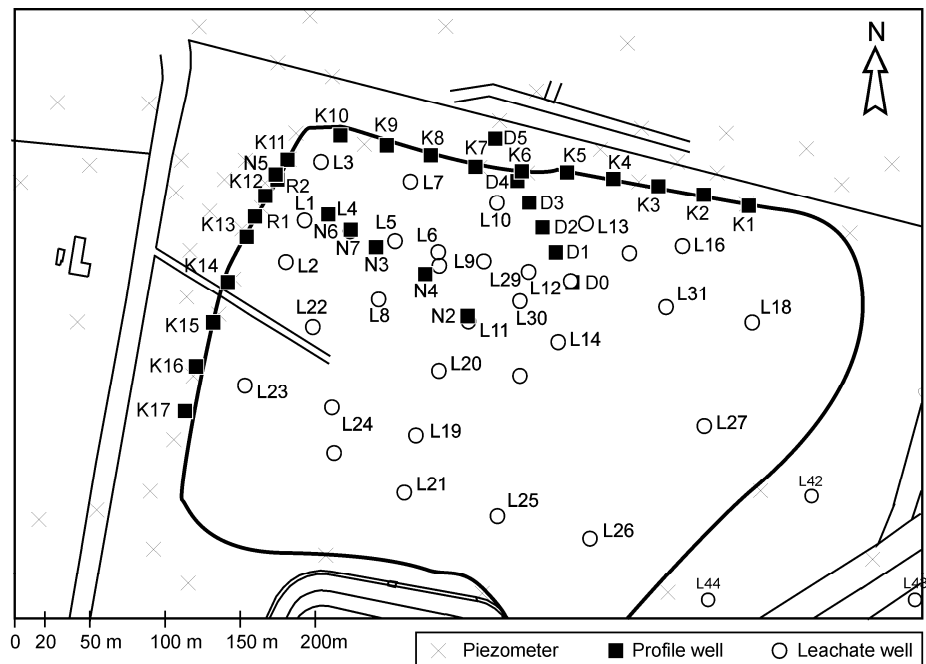
Tabel 5.1 Kalibrerede hydrauliske ledningsevner (m/dag) for de geologiske lag ved Grindsted gamle losseplads¹⁴. Beskrivelsen af de geologiske lag fremgår af figur 4.2. I den gennemførte kalibrering er der udeladt geologiske lag med begrænset udbredelse.

Geologisk enhed	Horisontal hydraulisk ledningsevne	Vertikal hydraulisk ledningsevne
Kvartær, smeltevandssand, fin til medium, 0-6 m under terræn	37,5	1,5
Kvartær, smeltevandssand, fin, svagt siltet, sporadisk forekomst,	10	0,4
Kvartær, smeltevandsler og silt, ca. 6 m under terræn	0,5	0,02
Tertiær, miocænt, smeltevandsler- og silt, ca 6 m under terræn	1	0,04
Brunkul og tørv, ca. 6 m under terræn	0,5	0,02
Tertiær, miocænt glimmersand, fint, svagt siltet, Odderup formationen, ca. 6-12 m under terræn	7,5	0,3
Tertiær, miocænt ler, ca. 12 m under terræn	0,05	0,002
Tertiær, miocænt glimmersand, nedre magasin, ca. 12-80 m under terræn, Odderup formationen	80	3,2

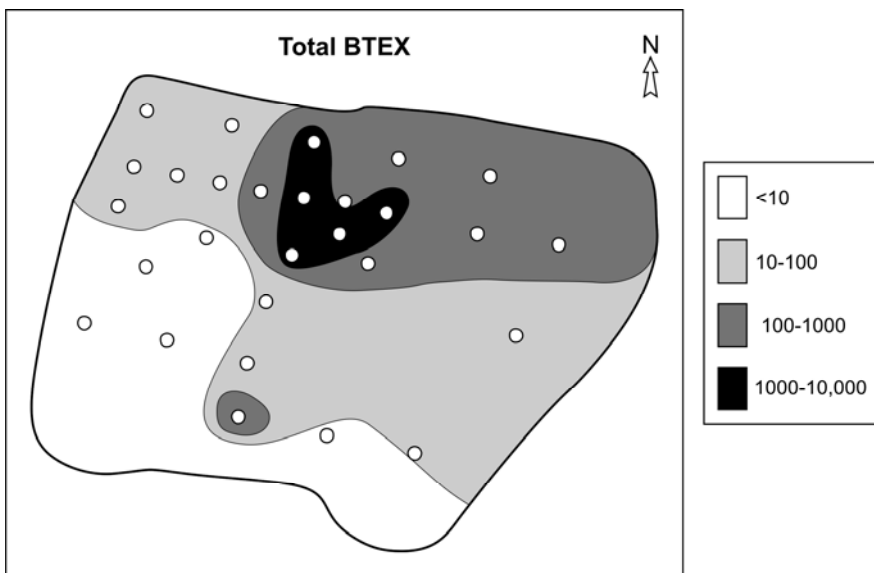
6 Perkolatkarakterisering og udstrømning

6.1 Perkolatkarakterisering – arealmæssig variation

Den historiske udredning indikerede, at der kunne være store forskelle i perkolatsammensætningen henover lossepladsens areal på grund af de tilstedeværende lokale kemikalieaffaldsdepoter. For at belyse den arealmæssige variation i perkolatsammensætning blev der etableret cirka 30 perkolatboringer bestående af jernrør med perforeret spids, som blev rammet gennem affaldet og ned i de øverste 30 cm af det underliggende grundvand. Placeringerne af perkolatboringerne kan ses på fig 6.1. Det forventedes, at det øverste grundvand under lossepladsen ville være praktisk talt ufortyndet perkolat dannet ved infiltration gennem de umiddelbart overliggende affaldslag. Boringerne blev prøvetaget med et specielt udviklet udstyr for at minimere tabet af flygtige stoffer (for detaljer se andet steds¹) og analyseret for generelle perkolatparametre (klorid, ammonium, NVOC m.fl.) samt aromatiske hydrocarboner (benzen, toluen, ethylbenzen, xylener – BTEX). Figur 6.2 viser et konturplot af BTEX'erne på lossepladsens areal. Det ses tydeligt, at det kun er, hvor kemikalieaffaldsdepoterne er beliggende, at der findes signifikante koncentrationer af BTEX (som til gengæld i udvalgte boringer er tæt på 10.000 µg/L). Det er især toluen, som findes i høje koncentrationer.



Figur 6.1 Placeringen af perkolatboringerne (benævnt L)^{1,17}, transektboringer (benævnt D og N) og kantkortlægningsboringerne (benævnt K)¹⁵



Figur 6.2 Kontur plot for summen af BTEX-koncentrationen i perkolatboringerne (koncentrationer i $\mu\text{g/L}$)¹⁵.

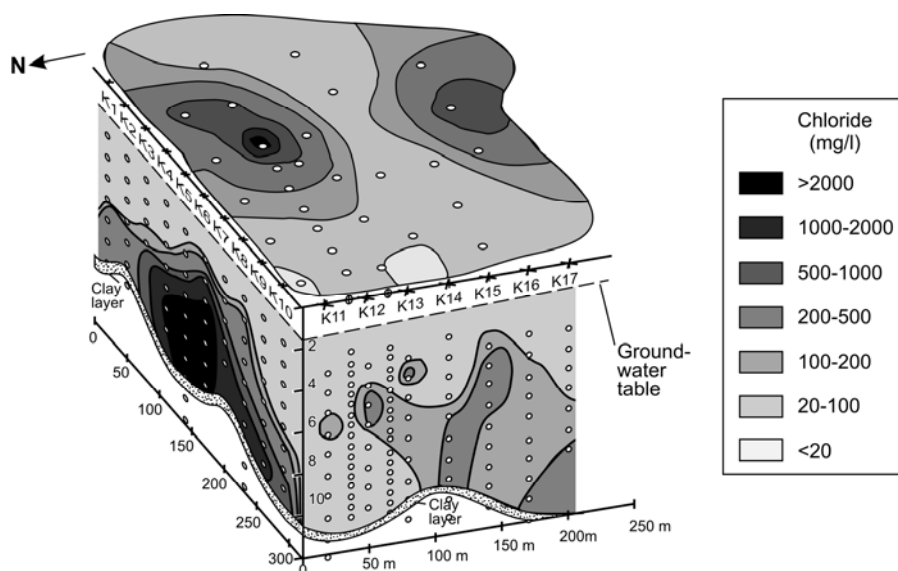
I 2006 blev tilstanden af de gamle perkolatboringer i hot spot området undersøgt. Kun to blev fundet i en stand, som muliggjorde gen-prøvetagning. Der blev suppleret med tre nye perkolatboringer i hot spot området. De udtagne prøver blev analyseret for de samme parametre som i de gamle undersøgelser, men det primære formål var at belyse perkolatets indhold af klorerede stoffer, sulfonamider og barbiturater, som også blev analyseret – se tabel 6.1⁶. Indholdet af diverse stoffer (ammonium, NVOC, BTEX) var noget lavere end fundet i den gamle undersøgelse på nær i boring L29, som også var den eneste boring med meget høje indhold af klorerede stoffer – herunder også nedbrydningsprodukterne DCE og vinylklorid. Fundet af DCE og vinylklorid afspejler, at der foregår dekloreringsprocesser i affaldslagene og/eller i selve grundvandsmagasinet. I boring L29 fandtes også høje indhold af sulfonamider, mens indholdet af barbiturater i denne boring var lavere end i de fem andre boringer. Der var i øvrigt også fundet høje koncentrationer i affaldsprøver udtaget i de overliggende affaldslag over boring L29 (se afsnit 3.1).

Undersøgelsen fra 2006 (finansieret af DTU-interne midler) skal ikke betragtes som en fyldestgørende kortlægning af udsivning af de nye stoffer, men kun som en indikation af, at der stadig kan findes meget høje indhold af både BTEX, klorerede stoffer (inklusive nedbrydningsprodukter), barbiturater og sulfonamider i affaldslagene og i perkolatet.

6.2 Udstrømning af perkolat fra lossepladsen

Med udgangspunkt i de hydrauliske forhold omkring lossepladsen, som viste en generel nordvestlig strømningsretning og placeringen af ”perkolat-hot spottet” blev der langs de nedstrøms kanter af lossepladsen udført en såkaldt kantkortlægning, hvor grundvandets sammensætning blev kortlagt som funktion af dybden i 18 rammeboringer (placeringen af rammeboringerne kan ses af figur 6.1). Rammeboringerne blev stoppet, da de nåede ned i det ler/silt-lag (ca. 10 m under terræn), som også findes på vestkanten. De udtagne grundvandsprøver blev blandt andet analyseret for klorid, ammonium og NVOC. Figur 6.3 viser et tre-dimensionelt billede af kloridkoncentrationen i det analyserede perkolat (på den vandrette flade) og kloridkoncentrationerne i det analyserede grundvand langs et nordlig og et vestligt snit. Billederne for ammoni-

um og NVOC er meget tilsvarende¹⁵. Var der blevet analyseret for nogle af de organiske stoffer, som senere blev fundet i grundvandet under hot spot (se Tabel 6.1) var disse med stor sandsynlighed også blevet observeret i kantkortlægningen. Figuren viser tydeligt, at udstrømningen primært sker i en nord-nordvestlig retning som forventet ud fra de lokale strømningsretninger. Man observerer også, at perkolatfanen er meget bred, hvilket kan skyldes de sæsonmæssige ændringer i de lokale strømningsretninger (se figur 5.3). Ligeledes ser man, at koncentrationerne stiger med dybden, således at de højeste koncentrationer blev fundet umiddelbart over ler/silt-laget. Den nedadrettede transport kan skyldes densitetsforskelle mellem uforurenet og forurenet grundvand, samt de specielle hydrologiske forhold, som er observeret i nærområdet (se afsnit 5.2). Havde man også undersøgt grundvandets sammensætning under ler/silt-laget, havde man formentlig også observeret forhøjede koncentrationer her.



Figur 6.3 Tre-dimensionelt billede af kloridkoncentrationen i det analyserede perkolat (på den vandrette flade) og kloridkoncentrationerne i det analyserede grundvand langs et nordligt og et vestligt snit (på de lodrette flader)¹⁵.

Tabel 6.1 – Resultater af perkolatanalyser af de fem prøvetagne perkolatboringer i undersøgelsen fra 2006⁶.

Stof	Perkolatboring				
	L6	L12	L13	L14	L29
NVOC (mg/L)	130	252	8.3	236	357
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	125	196	21	97	199
BTEX					
Benzen (µg/L)	18	230	9.40	440	62
Toluen (µg/L)	29	21	11	11	1600
Ethylbenzen (µg/L)	43	48	7.5	25	14
m-xylen (µg/L)	120	120	11	31	43
o-xylen (µg/L)	43	30	4.2	12	14
Klorerede stoffer					
1,1-dichloroethylen	<1	<1	<1	<1	<1
Cis-1,2-dichloroethylen (µg/L)	32	52	11	3.8	10880
Trans-1,2-dichloroethylen (µg/L)	1.7	1.5	1.5	1.8	75
Trichloroethylen (µg/L)	5.3	2.0	4.2	2.4	120
Tetrachloroethylen (µg/L)	1.4	14	1	2.0	7
Vinyl chloride (µg/L)	<1	4.38	<1	<1	600
Barbiturater					
Barbital (µg/L)	250	100	13	130	0.68
Amobarbital (µg/L)	340	470	94	310	1.3
Butobarbital (µg/L)	64	100	<5	35	0.048
Pentobarbital (µg/L)	130	130	20	340	0.43
Secobarbital (µg/L)	9	18	4	13	<2
Dapsone (µg/L)	<1	<1	2	<1	<1
Sulfonamider					
Sulfadiazine (µg/L)	450	380	31	51	2500
Sulfathiazole (µg/L)	47	92	17	58	4300
Sulfamerazine (µg/L)	800	770	43	220	3000
Sulfamethiazole (µg/L)	790	620	18	130	3100
Sulfamethazone (µg/L)	870	1100	270	4000	7600
Sulfadoxin (µg/L)	<1	<1	<1	<1	<1
Sulfamethoxazole (µg/L)	<1	<1	<1	<1	<1
Sulfanilic acid (µg/L)	56000	3300	380	1800	83000
Sulfanilamid (µg/L)	270	360	15	6700	2000
Sulfaguanidine (µg/L)	3400	5600	210	5700	18000

6.3 Perkolatets lodrette bevægelse

De allerede diskuterede observationer af generelt stigende koncentrationer med dybden i det terrænnære grundvandsmagasin viser således, at der er en væsentlig lodret komponent i perkolatudstrømningen. Dette kan – som allerede diskuteret i afsnit 5.2 – skyldes specielle hydrologiske forhold omkring pladsen og perkolatets højere densitet. Det er derfor af stor vigtighed at få belyst, om der sker en yderligere lodret transport gennem ler/silt-laget og ned i grundvandsmagasinet i det miocæne sandlag. For at belyse dette, blev ler/siltlaget gennemboret i et antal rammeboringer^{15,17}. I en enkelt

rammeboring, D2 (se Figur 6.1) blev der fundet endnu højere kloridkoncentrationer under ler/silt-laget i forhold til dybderne umiddelbart over. Ved lossepladsens vestkant blev i flere rammeboringer udført i 1992 og 1994 (ikke publiceret) fundet meget høje koncentrationer af perkolatparametre under ler/silt laget i en dybde på 15-25 m under terræn. Det var karakteristisk, at koncentrationerne af organisk stof (ca. 500 mgNVOC/L), klorid (ca. 500 mg/L), og toluen var meget høje (1-10 mg/L). Der blev også fundet PCE og TCE (1-2 mg/L). I boringerne i Lanzky og Olsens undersøgelser¹⁷, hvor der blev etableret et tracé af rammeboringer i grundvandets strømningsretning i lossepladsens vestlige del (benævnt N på figur 6.1), blev der også fundet høje perkolatkoncentrationer under ler/silt-laget. Dette gjaldt igen specielt for toluen, som i det hele taget blev fundet i høje koncentrationer i grundvandet under lossepladsen. Desværre var det kun muligt at ramme igennem ler/silt-laget i to boringer i disse undersøgelser. Undersøgelserne sammenholdt med den efterfølgende modellering af resultaterne indikerer kraftigt, at en væsentlig del af fanen i det øvre grundvand over ler/silt-laget strømmer gennem laget i området under lossepladsen og ned i de miocæne, grundvandsførende lag.

Der er således flere observationer, som viser, at grundvandsmagasinet under ler/silt-laget er kraftig perkolatpåvirket under lossepladsen. Dette tyder på, at ler/siltlaget ikke er fuldstændigt gennemgående eller har en hydraulisk ledningsevne, som muliggør en væsentlig perkolatgennemstrømning. Det vil således være forventeligt at finde høje koncentrationer af alle de stoffer, som er fundet i det øvre perkolat (klorid, ammonium, NVOC, BTEX, klorerede stoffer, sulfonamider og barbiturater), i de nedre, miocæne grundvandsførende lag. Det vides dog ikke, hvor dybt i de miocæne sandlag at perkolatet er trængt ned under selve lossepladsen, da kun de øverste par meter af grundvandsmagasinet under ler/silt-laget blev prøvetaget. Der eksisterer dog analyse-resultater fra boring GLU1 (placeret mindre end 100m nedstrøms lossepladsen), som viser, at perkolatet har nået stor dybde. I afsnit 7.5 diskuteres den videre spredning i grundvandsmagasinet..

6.4 Afgasning til umættet zone

Med henblik på at vurdere, om poregasmålinger kan benyttes til at afgrænse perkolatfaner nedstrøms for lossepladser, blev der i 1993/94 gennemført et eksamensprojekt^{18,19,20}. Der blev gennemført tre undersøgelser med poreluftanalyser for metan, kuldioxid og ilt:

- kortlægning i tre transekter, ét beliggende over den grundvandsmoniterede strømlinie (se afsnit 7), og to langs lossepladsens nedstrøms kanter hvor grundvandets sammensætning også var blevet kortlagt (se afsnit 6.2),
- arealmæssig kortlægning oven over den forventede placering af hovedperkolatfanen
- profiler (koncentration som funktion af dybden) tre udvalgte steder.

Undersøgelserne viste, at hvis man målte poreluftsammensætning før at efterårets store infiltration sætter ind, fandtes forhøjede kuldioxid koncentrationer i poreluften de steder helt tæt på lossepladsen, hvor der også var fundet høje perkolatkoncentrationer i det underliggende grundvand. Længere nedstrøms fra lossepladsen sås ingen entydig sammenhæng, hvilket formentlig skyldes, at der på alle tidspunkter af året vil eksistere en ”pude” af uforurennet grundvand - hidrørende fra infiltrerende regnvand – oven på perkolatfanen. Denne ”pude” vil kraftigt dæmpe transporten af flygtige stoffer fra perkolatfanen til den umættede zone, da diffusionsprocesser i vand er meget langsomme. Tilsvarende observationer er gjort i andre lignende undersøgelser^{21,22}.

7 Naturlig nedbrydning i grundvandet

7.1 Grundvandskvalitet af øvre grundvand

Det øvre grundvandsmagasin er velbeskrevet i undersøgelser fra 1995²³ samt i en række vandprøver fra GLU3-4 fra tidligere undersøgelser^{9,24}. Resultaterne er sammenfattet i Tabel 7.1. pH er lav, og området er kalkfattigt, så det samlede ionindhold er lavt. NVOC er 1-3 mg/l. Der er tale om en oxideret vandtype med et moderat nitratindhold. Det overraskende lave nitratindhold skyldes, at området er en blanding af hede og skov og altså ikke påvirket af landbrugsmæssig anvendelse. Sulfatkoncentrationerne er på 10-40 mg SO₄/l, og indholdet af opløst jern er meget lavt, hvilket svarer fint til de oxiderede forhold.

Tabel 7.1 Grundvandskvalitet i øvre grundvandsmagasin, baseret på flere undersøgelser^{9, 23,24}.

Parameter	Enhed	Koncentration
pH	-	4,5-6
Elektrisk ledningsevne	µs/cm	100-300
Klorid	mg/l	12-30
NVOC	mg/l	1-5
Calcium	mg/l	2-20
Magnesium	mg/l	1-5
Natrium	mg/l	10-20*
Kalium	mg/l	1-5
Ilt	mg/l	1-8
Nitrat	mg/l	0-20
Ammonium	mg/l	< 0,1
Mangan, opløst	mg/l	<0,1
Jern, opløst	mg/l	<0,3
Sulfat	mg/l	10-40
Methan	mg/l	<0,1

*Natrium er lokalt påvirket af vejsaltning

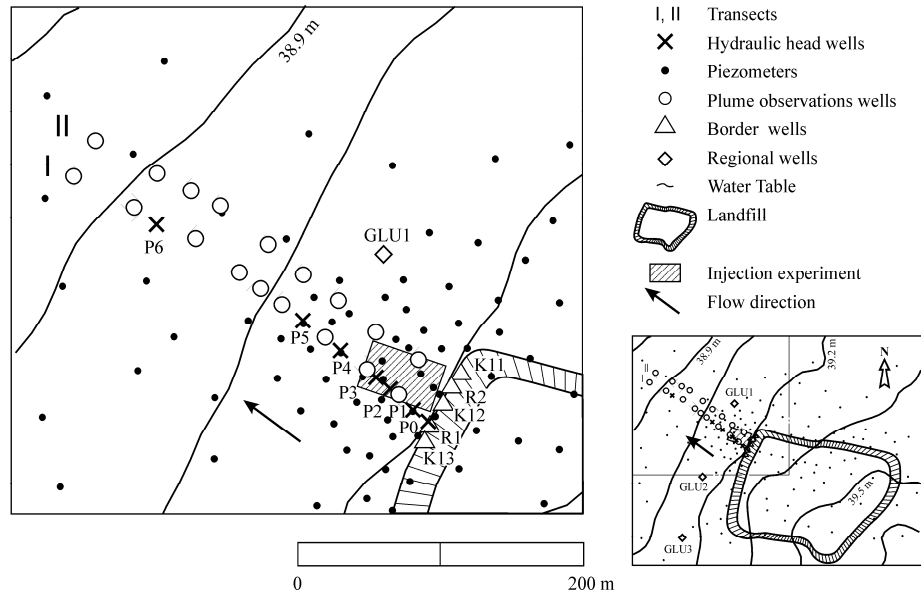


Figure 7.1 Undersøgelser i nærområdet ved vestkanten af Grindsted gamle losseplads. Injektionsforsøget på figuren er beskrevet i Rügge et al., 1999²⁸.

7.2 Uorganisk fane og redoxforhold

Forureningsfanen ved lossepladsens vestkant er ikke afgrænset vertikalt og horisontalt i de udførte undersøgelser i 1995^{23,25}, da undersøgelserne havde et andet formål. Den øvre forureningsfane (over silt/ler laget) er kortlagt i detaljer i to langsgående transekter (Figur 7.1). Horisontalt viser kantkortlægningen, at der sker udsivning langs hele vestkanten. Ældre data fra Rambøll og Hannemann undersøgelsen⁹, monitorering fra Ribe Amt i 90'erne og upublicerede data fra DTU viser, at GLU2 er tydeligt påvirket af perkolat (anaerobe forhold, klorid, NVOC). GLU3 og GLU4 er uforurenede. Det skal bemærkes, at der for GLU3 og GLU4 begge kun er ganske få data for vandkvaliteten, så det kan ikke afvises, at der kan ske påvirkning af især GLU3.

Forureningsfanen ved lossepladsens vestkant har et moderat indhold af klorid, uorganiske salte (calcium, magnesium, natrium og kalium) og ammonium (se figur 7.2). Kationerne vil generelt blive tilbageholdt ved ionbytning.

Der er et indhold af NVOC på ca. 80-120 mg/l. Redoxforholdene er her methanogene (figur 7.3). Det skyldes omsætning af NVOC, som driver redoxprocesserne (se figur 7.2 og 7.3). Der dannes en sekvens af redoxzoner strækkende sig fra methanogene forhold ved lossepladsens vestkant til aerobe forhold ca. 250 m nedstrøms. Der dannes meget høje koncentrationer af opløst jern og mangan på grund af jern- og manganreduktion i et område ca. 50-150 m nedstrøms.

De kvartære aflejringer har generelt en større jernreduktionskapacitet end de tertiære aflejringer¹⁰. Det er afspejlet ved målinger af oxidationskapaciteten på sedimenterne i transekterne nedstrøms pladsen. Oxidationskapaciteten er 14-35 $\mu\text{eq/g}$ tørvægt for de kvartære sandlag, mens den er under 5 $\mu\text{eq/g}$ tørvægt for det tertiære sand i det øvre magasin.

7.3 Skæbne af forureningsfanen i det øvre grundvandsmagasin

Udbredelsen af forureningsfanen i det øvre magasin strækker sig for de aromatiske forbindelser ca. 50-75 nedstrøms lossepladsen²⁵. De klorerede opløsningsmidler findes stort set ikke i denne del af fanen, hvilket er lidt overraskende set i lyset af forekomsten i hot spot området. Det kan skyldes, at forureningsfanen fra hot spot allerede på dette tidspunkt er dykket under lerlaget (se diskussion i afsnit 6.4). Der er også en del andre organiske forbindelser (kamfer), men ingen af stoffer forekommer systematisk i meget høje koncentrationer.

De farmaceutiske stoffer forekommer også i dette område²⁶. Det er lidt overraskende, da de øvrige stoffer mere peger på almindeligt perkolat end perkolat fra industridepotet. En mulig forklaring ses på Figur 2.1, hvor flyfotos fra 1964 og 1971 afslører en slamgrube tæt ved vestkanten af lossepladsen. En række af de kendte produkter fra Grindstedværkets produktion identificeres, herunder sulfonaminder, barbiturater, propyphenazon og aniliner. Koncentrationen af sulfanilsyre er mere end 6 mg/L ved lossepladsens kant.

Den detaljerede kortlægning langs vestkanten dokumenterer, at de miljøfremmede stoffer forsvinder inden for de første 150 m fra lossepladsen. Der er tre mulige forklaringer på de miljøfremmede organiske stoffers forsvinden:

- Fortyndning
- Sorption
- Nedbrydning

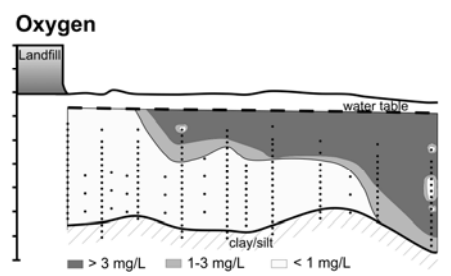
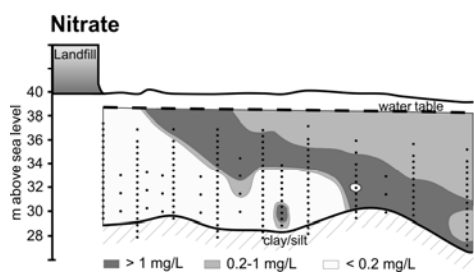
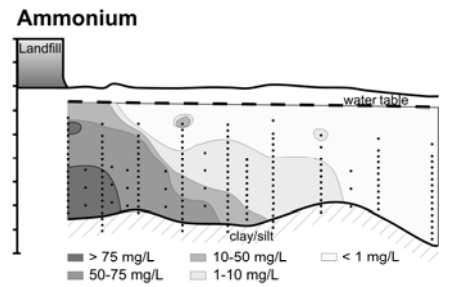
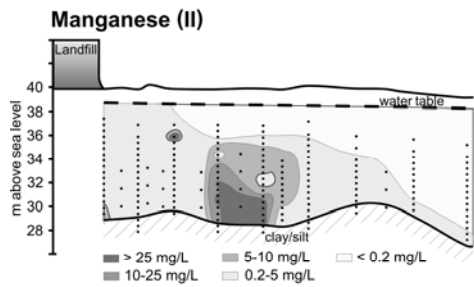
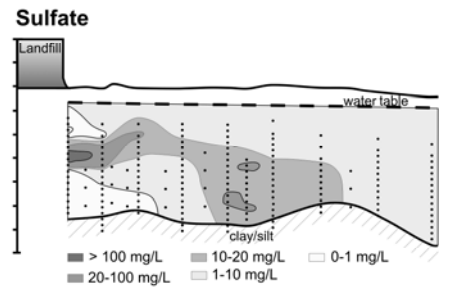
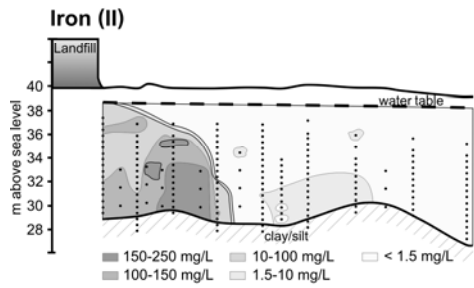
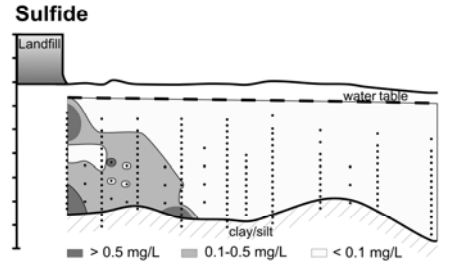
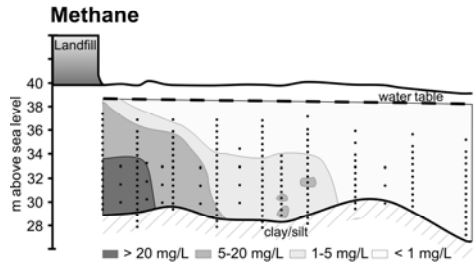
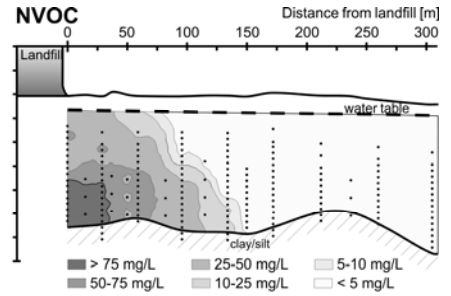
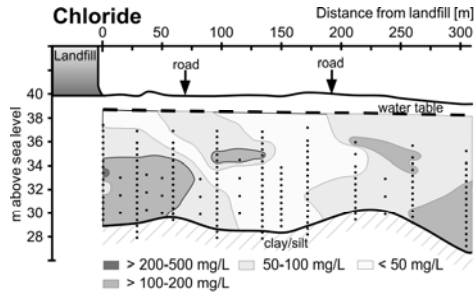
Fortyndning er vanskelig at belyse i området vest for de to krydsende veje, da chloridkoncentrationerne her bliver påvirket af vejsaltning. På den første del (ca. 50 m) er der entydigt ikke tale om fortynding. Der er gennemført en række modelsimuleringer¹⁴, som bekræfter, at fortynding heller ikke i større afstand alene kan forklare stoffernes forsvinden.

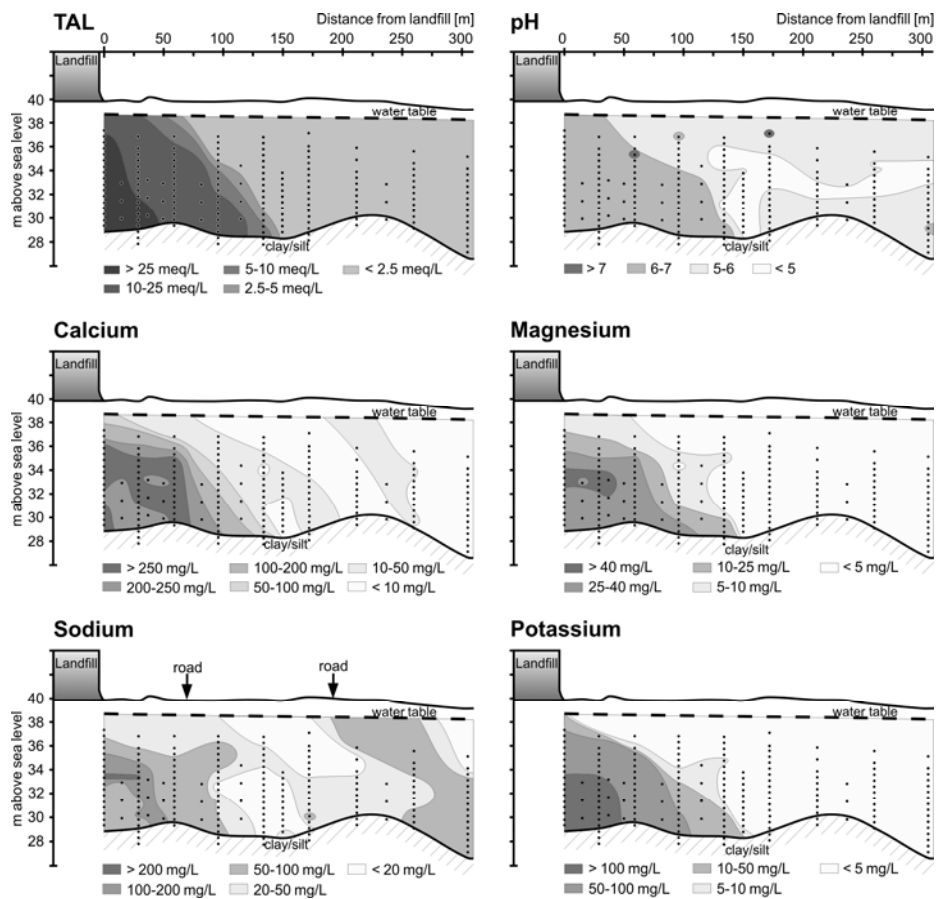
Sorption kan udelukkes som en forklaring. Der er i et feltinjektionsforsøg (/27/, se placering på figur 7.1) vist, at selv for naphthalen vil retardationsfaktoren ikke være større end 1,2. Dermed kan stoffernes forsvinden set i lyset af lossepladsens alder og strømningshastigheden ikke tilskrives sorption.

Tilbage er den eneste forklaring dermed nedbrydning, men der er ikke etableret et egentligt bevis. I et omfattende injektionsforsøg og ved in situ tester-forsøg er nedbrydningen i selve forureningsfanen dokumenteret for toluen og xylener^{27,28}. Dette er understøttet af laboratorieforsøg, men det er aldrig lykkedes direkte at påvise at benzen bliver nedbrudt i forureningsfanen. Resultaterne af disse forsøg er samlet i tabel 7.2.

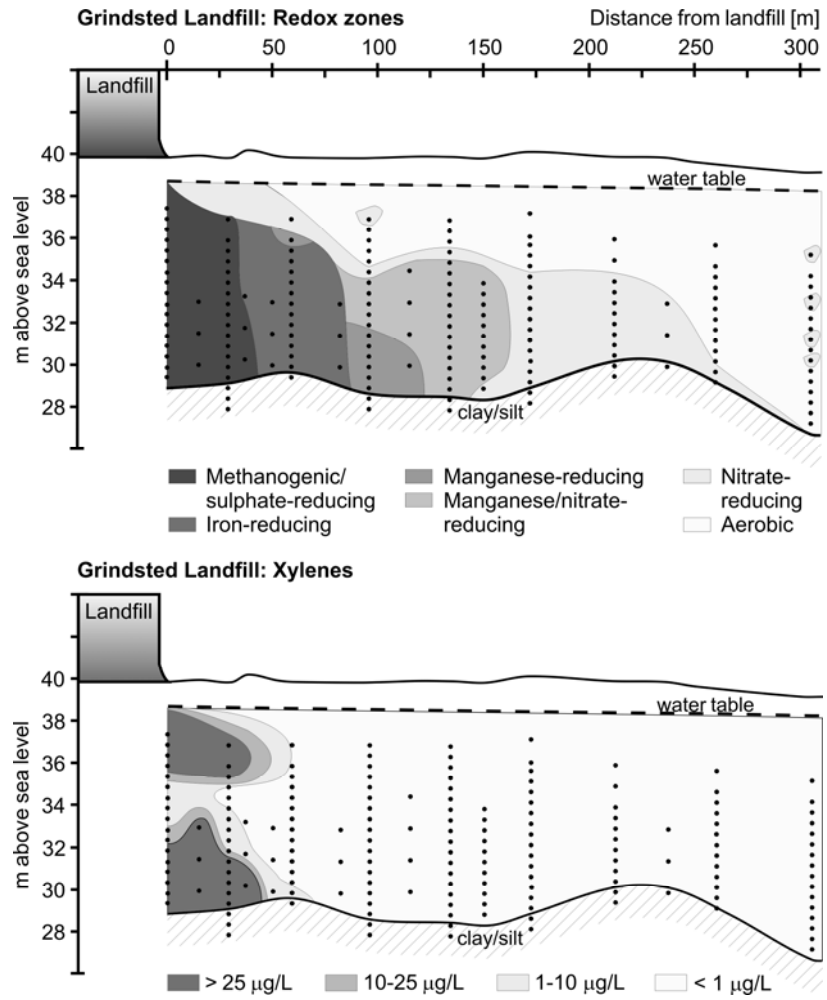
I et modelstudium blev udbredelsen af de aromatiske stoffer simuleret¹⁴. Ved at kombinere placeringen af redoxzonerne, stoffernes udbredelse og de hydrauliske forhold med invers modellering blev der fastlagt sandsynlige nedbrydningsrater. Simuleringerne støttede for alle stoffer, at der skete nedbrydning i forureningsfanen.

PCE og TCE blev som skrevet ikke fundet ved lossepladsen kant i det øvre magasin. I det omfattende anaerobe injektionsforsøg blev stofferne medtaget, da de havde interesse for andre del af lossepladsen og for andre lokaliteter. PCE blev nedbrudt til TCE ved anaerob dechlorering²⁸.





Figur 7.2 Klorid, NVOC og redoxfølsomme parametre i et transekt i grundvandet's strømningssretning ved vestkanten af lossepladsen²³. Placeringen svarer til transekt I på figur 7.1.



Figur 7.3 Redoxforhold og skæbnen af xylener i det øvre magasin nedstrøms vestkanten af Grindsted gamle losseplads^{23,25}. Placeringen svarer til transekt I på figur 7.1.

Tabel 7.2 Nedbrydelighed af NVOC og miljøfremmede organiske stoffer som er fundet ved Grindsted gamle losseplads. Der er også medtaget klorerede opløsningsmidler, selvom de ikke forekommer i det øvre grundvand, men de forekommer i selve lossepladsen og i den nedre forureningsfane. I tabellen er angivet typisk koncentrationsniveau i øvre grundvand umiddelbart nordvest for lossepladsen, og hvorledes nedbrydeligheden er dokumenteret. Fane: nedbrydning i forureningsfane; INJ, injektionsforsøg, ISM, forsøg med in situ testere, LAB, laboratorieforsøg. Tabellen er udtaget fra flere publikationer^{23, 27, 25, 28}. De relative angivelser af nedbrydeligheder er understøttet af udførte modelsimuleringer¹⁴.

Stoffer	Fund ved lossepladsen	Type af dokumentation for nedbrydning				Nedbrydelighed	Kommentar
		Fane	INJ	ISM	LAB		
	µg/L						
Benzen	2-77	X	-	-	-	Langsom	Jernreducerende forhold
Toluen	1-14	X	X	X	X	Hurtig	
Ethylbenzen	0-68	X	-	-	-	Moderat	Ingen konklusion fra injektionsforsøg
m/p-xylen	3-222	X	-	-	X	Moderat	
o-xylen	1-1547	X	X	-	X	Hurtig	
Naphthalen	1-31	X	-	-	-	Langsom	
PCE	Ikke fundet	-	X	X	X	Moderat	Methanogene/sulfat-reducerende forhold
TCE	Ikke fundet	-	X	X	X	Moderat	Methanogene/sulfat-reducerende forhold
NVOC (mg/l)	34-102	X	-	-	-	Moderat	

X: Nedbrudt

-: Ikke dokumenteret

7.4 Forureningsfane i nedre grundvandsmagasin

Den uforurenede uorganiske grundvandskvalitet i det nedre magasin er belyst ved ganske få vandprøver. En overordnet sammenligning af vandkemien i det øvre og nedre magasin fra de tidlige undersøgelser fra 1988 konkluderer⁸, at forholdene må forventes at være meget ens med hensyn til makroioner. Umiddelbart vil det forventes, at det uforurenede dybe magasin er mere reduceret, hvilket vil afspejles i lavt ilt- og nitratindhold, samt højere koncentrationer af jern og mangan.

Vandanalyser for GLU3 og GLU4 viser klorid fra 15-30 mg/l og NVOC fra 1-5 mg/l i 1989⁹. Ilt og nitrat forsvinder tydeligvis under det miocæne lerlag (ca. 15 m) i større dybde. pH er typisk omkring 6,2. Forventningen vil være en jernreducerende vandkvalitet med ringe indhold af ilt og nitrat. Den samlede oxidationskapacitet vil være svarende til jernreduktionskapaciteten, som vil være ganske begrænset i det miocæne sandlag ud fra målinger over lerlaget¹⁰.

Forureningsfanen i det dybe magasin er kun kortlagt i GLU 1 og GLU2. GLU1 er absolut den mest interessante, da den som den eneste boring i nærområdet ved lossepladsen belyser perkolatkvaliteten dybere end 50 m.u.t.. Desværre er boringen kun prøvetaget sporadisk i perioden og placeringen af filtrene samt filtersætningens kvalitet er diskutabel.

GLU2 har fem filtre, hvor af de 3 nederste er placeret under ler/silt laget. Der er på baggrund af målinger fra 1989-1992 (Rambøll og Hannemann undersøgelsen⁹, upubli-

cerede data fra DTU og analyser fra Ribe Amt) ca. 50-70 mg/l NVOC i filtre over silt/lerlaget. Der er aftryk af perkolat ned til 31 m, men koncentrationerne af NVOC er kun 10-20 mg/l under lerlaget. Det dybeste filter 44 m.u.t. er sandsynligvis ikke påvirket af lossepladsen.

GLU1 har 4 filtre i 26, 38, 60 og 74 mut. Udvalgte målinger fra 1986/87 er gengivet i tabel 7.1. Der er tegn på påvirkning ned til 74 mut. I 26 m og 38 mu.t. er der meget høje koncentrationer af klorid og NVOC. Der er også meget høje koncentrationer af sulfanilsyre (40 mg/l) og i mindre omfang sulfonamid. I de dybere lag er sulfanilsyren det mest bemærkelsesværdige, da der helt ned til 74 m.u.t. er fundet 1.7 mg/l. Koncentrationen af sulfanilsyre er meget høj set i lyset af koncentrationerne inde i lossepladsen (Tabel 6.1).

I Tage Sørensen's rapport⁸ er der også udført en mere omfattende screeningsanalyse på en vandprøve 26 m.u.t., som afslører en del svovlforbindelser, men overraskende nok er der ikke fundet nogen barbiturater. Det kan dog skyldes den anvendte analysemetode.

Senere resultater fra bl.a. Ribe Amts monitoring i 90'erne bekræfter dette billede med NVOC koncentrationer på ca. 200 mg/l og kloridkoncentrationer på 500 mg/l 26 m.u.t.. Analyser for klorerede opløsningsmidler viser ca. 4 µg/l af PCE og TCE, samt TCE på 0,39 µg/l i det dybeste filter 74 m.u.t. Der er ikke analyseret for nedbrydningsprodukter. De samlede data fra Ribe Amts monitoring har desværre ikke kunnet fremskaffes.

Tabel 7.3 Analyser af klorid, NVOC og sulfanilsyre i boring GLU1 (DGU 114.1384)⁸ fra 1986 og 1987. Alle koncentrationer i mg/L. Bemærk at der er to filtre i det såkaldte hovedfilter.

Filtnummer, Prøvetagningsår	Dybde	Klorid	NVOC	Sulfanilsyre
Filter 3, 1986	26-27 m	247	82	40
Hovedfilter, 1987	20-38 m 56-64 m	117	Ej analyseret	Ej analyseret
Filter 2, 1986	59-60 m	35	9,1	1,4
Filter 1, 1986	73-74 m	36	9,7	1,6

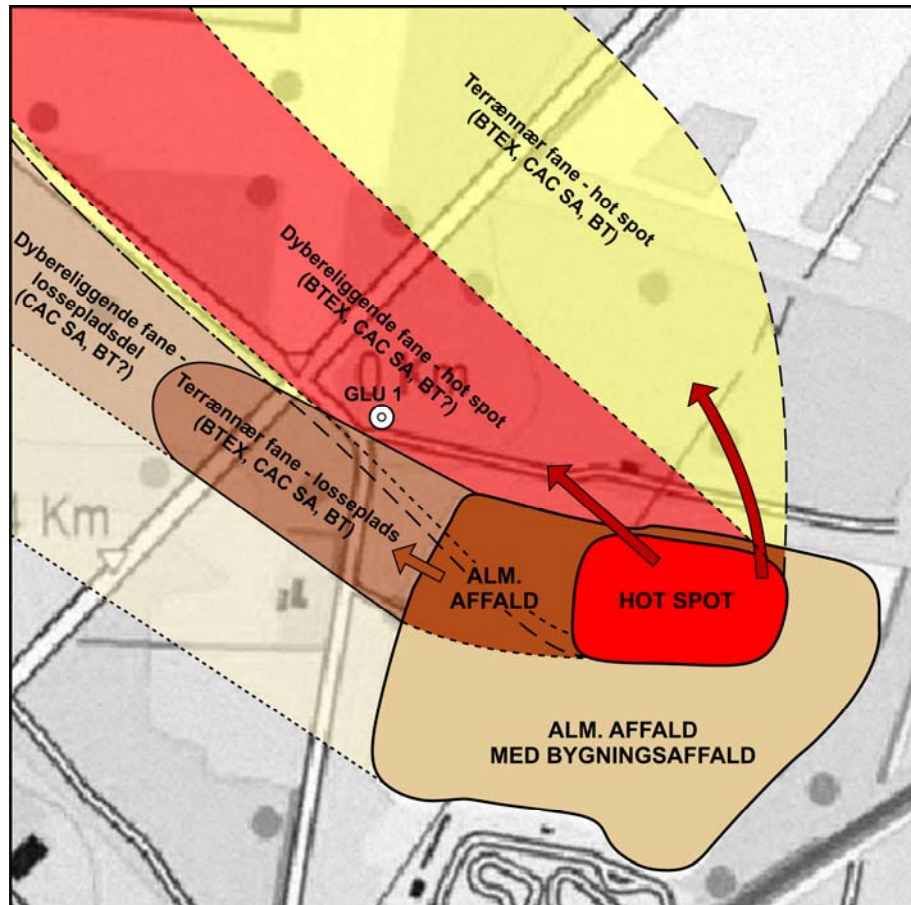
8 Konceptuel spredningsmodel og potentielle ricisi

8.1 Konceptuel model

Den beskrevne geologi, hydrogeologi og forureningsudbredelse giver basis for at foreslå en samlet spredningsmodel for forureningen ved Grindsted gamle losseplads. Der er skelnet mellem forurening hovedsagelig fra hotspot med industriaffald og den mere generelle forurening fra lossepladsen. Det skal understreges, at udbredelsen i det dybe magasin ikke er dokumenteret i større afstande fra lossepladsen.

Figur 8.1 viser den forventelige faneudbredelse i det terrænnære magasin væk fra det helt dominerende hot spot område. Fanen er stipt et stykke væk fra lossepladsen, da vi ikke ved, hvor langt væk den terrænnære fane kan spores – dels kan der sker naturlig nedbrydning – dels kan fanen dykke ned under ler/siltlaget. Perkolatets sammensætning fra hot spot er beskrevet i afsnit 6. De primære stoffer vil være klorid (3000 mg/l), ammonium (1000 mg/l) og toluen (15 mg/l), hvor værdierne i parentes er maksimale koncentrationer observeret tæt på lossepladsen¹⁵. De senere undersøgelser fra 2006 viste, at man også kan forvente at finde nedbrydningsprodukter af klorerede opløsningsmidler (især cis-DCE og vinylklorid), sulfonamider og barbiturater i høje koncentrationer. Koncentrationsniveauet for de sidst nævnte stoffer er meget usikkert, da der kun er lavet enkelte analyser på grundvand udtaget under hot spot⁶.

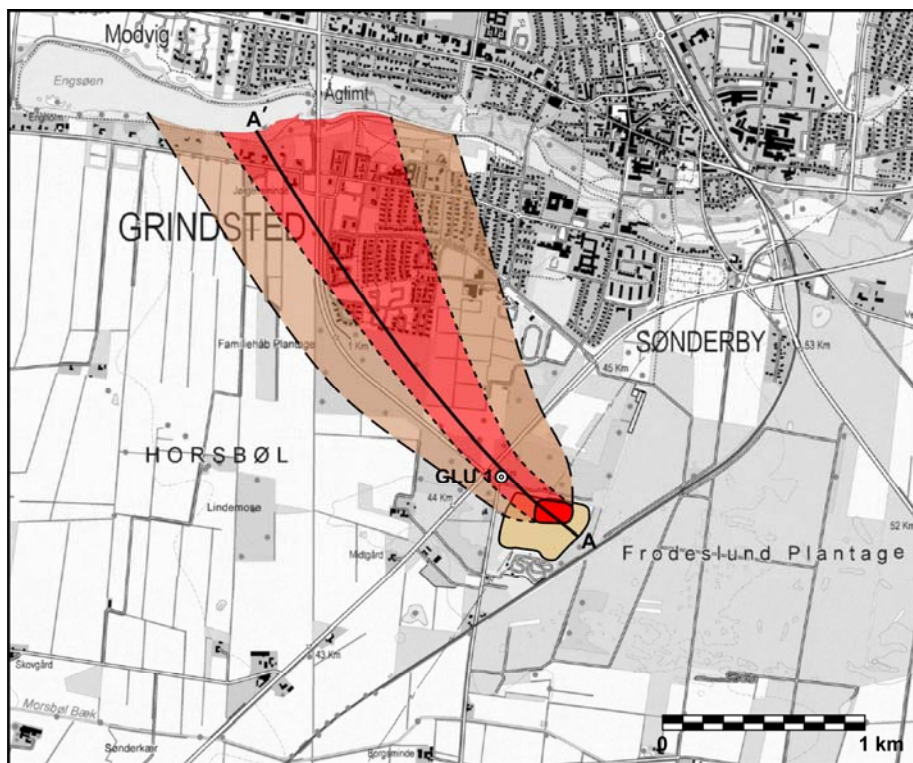
Figuren viser også en dybereliggende fane som er mere spekulativ. Formentlig indeholder fanen de samme stoffer som den terrænnære fane, men dybden af fanen er ukendt. Retningen understøttes af analyseresultater fra GLU1, som er markeret på figuren, samt den generelle strømningsretning i området. GLU1 er som beskrevet tydeligt påvirket af stoffer fra hot spot i stor dybde.



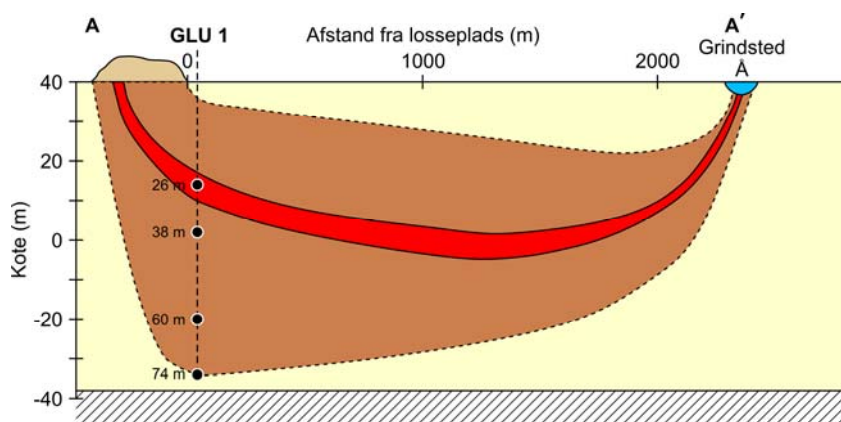
Figur 8.1 Planskitse af formodet udstrømning fra lossepladsen fra hot spot i nordvestlig retning og mod vest fra området med blandet husholdnings-og bygningsaffald.

I vestlig retning er den øvre forureningsfane velbeskrevet (Figur 7.2 og 7.3), og afspejler primært husholdningsaffald med en let påvirkning fra hotspot eller fra en grube ved vestkanten (se afsnit 7.3). Jo længere mod syd jo mere vil fanen være domineret af husholdningsaffald og især bygningsaffald. Målinger langs vestkanten af klorid (figur 6.3) og NVOC⁸ afspejler tydeligt disse tendenser. Forureningsfanen kan kun genfindes i en afstand op til 250 m fra lossepladsens kant. Mod syd er forureningsfanen afgrænset mellem den forurenede boring GLU2 og boring GLU3, der tilsyneladende er uforurenede.

Den dybe forureningsfane er hypotetisk i større afstande fra lossepladsen, da der ikke er boringer til større dybde her. Der er dog en stærk formodning om at forureningsfanen vil have en væsentlig udbredelse, da koncentrationerne er så høje ved nordkanten.



Figur 8.2 Planskitse af formodt forureningsfane i retning mod Grindsted Å.



Figur 8.3 Langsgående vertikalt snit af formodt forureningsfane fra hot spot i nordvestlig/vestlig retning til Grindsted Å.

8.2 Potentielle risici

Den regionale drikkevandsressource i området er primært knyttet til grundvandsførende lag (Bastrup formationen) under det nedre miocæne lerlag i ca. 70-80 m (Arnum formationen, afsnit 4.1). Risikoen for at forureningen vil true dette magasin er altså helt afhængig af spredningen vertikalt i det overliggende miocæne sandlag (Odderup formationen). Hvis der kun sker advektiv transport, vil der ved en transporthastighed på 100 m/år, en porøsitet på 0,33 og en nettonedbør på 400 mm, ske en vertikal transport på 1,2 m pr. 1000 m. Umiddelbart er der fundet forureningsstoffer ned til ca. 70 m i GLU1, hvilket tyder på, at der også er densitetsdrevet transport med i spillet. Dermed er der en reel risiko for gennemtrængning af det miocæne lerlag (Arnum for-

mationen). Hydraulisk antages det, at forureningen i sandlaget (Odderup formationen) over det miocæne lerlag vil søge opad ved Grindsted Å, og at åen for dette sandlag virker som en hydraulisk barriere. Det er også sandsynligt, at det miocæne lerlag findes over hele området. Hvis begge dele er korrekte, er der ikke en alvorlig trussel mod det dybereliggende sandlag under det nedre miocæne lerlag på sydsiden af åen. Omvendt vil vinduer eller decideret fravær af det miocæne lerlag være meget kritisk for spredning mod dybere grundvandsmagasiner.

Det er meget sandsynligt, at der vil ske en lokal påvirkning af Grindsted å og Engsøen 2-2,5 km fra lossepladsen, hvor forureningsfanen søger op i åen. Transporthastighederne er meget usikre, men en transporthastighed på 50-200 m/år er sandsynlig. Ved en transporthastighed på ca. 100 m/år tager det 25 år for en vandpartikel at komme fra lossepladsen til åen. Lossepladsens industridepot har en alder på mere end 40 år, så klorid og vandblandbare stoffer vil være transporteret hele vejen til åen. Koncentrationerne i forureningsfanen er høje tæt ved lossepladsen, og fortyndingen af en forureningsfane af den størrelse i en homogen sandet aflejring vil i den centrale del af forureningsfanen være meget begrænset.

Påvirkningen af åen kan være i form af klorid, iltforbrugende stoffer (NVOC, ammonium, Fe(II)) og miljøfremmede stoffer. Der er målt relativt højt indhold af cis-DCE under lossepladsen, så hvis stoffet er trængt ned i det miocæne lag, kan det have nået åen grundet en begrænset nedbrydningskapacitet. Potentielt kunne der også være toluen, barbiturater og sulfonamider afhængig af, hvad der sker af naturlig nedbrydning i det terrænnære og det miocæne lag ved de høje udgangskoncentrationer. Påvirkningen kan potentielt påvirke både den kemiske og økologiske tilstand i åen. Begge forhold er reguleret i EU's Vandrammedirektiv. Det ligger uden for formålet med denne rapport at vurdere de økologiske effekter af disse stoffer.

Omfanget af påvirkningen vil afhænge af forholdet mellem forureningsfluxen fra lossepladsen og vandstrømningen i åen. Desuden vil den naturlige nedbrydning i grundvandsmagasinet eller i nærområdet ved åen kunne afdæmpe påvirkningen for de miljøfremmede stoffer. Grundvandsmagasinet vil sandsynligvis som beskrevet i afsnit 7.4 være anaerobt (mangan/jernreducerende) naturligt. Der vil kunne ske en nedbrydning af det organiske stof med forbrug af jern- og mangan-hydroxider som elektronacceptorer. Det vil forøge indholdet af opløst jern og mangan. Ved åen kan nedbrydningen accelereres med adgang til ilt.

Så længe at forureningsfanen er anaerob kan den dannede jern og mangan transporteres i opløst form. Jern og mangan vil kunne udfældes i nærområdet ved åen eller i selve åen, hvor der formodes at være mere ilttrige forhold. Ammonium vil i hele grundvandsmagasinet blive tilbageholdt ved ionbytning. Teoretisk kan der i nærområdet ved åen igen ske en oxidation med ilt.

De miljøfremmede stoffer kan alle undergå mikrobiel nedbrydning. Hovedkomponenten i forureningsfanen er toluen, som er letnedbrydelig under jernreducerende forhold. Erfaringerne i lossepladsen ved vestkanten bekræfter dette, selvom hastigheden kan være langsommere på grund af mangel på elektronacceptorer. De klorerede opløsningsmidler vil alle kunne nedbrydes ved anaerob deklorering, men erfaringer fra lignende dybe forureningsfaner²⁹ viser, at det kan være en langsom proces. Tilstedeværelsen af det organiske stof fra lossepladsen kan dog være med til at forbedre forholdene, da der kan skabes mere reducerede forhold og er en kilde til hydrogen, som indgår i den anaerobe deklorering.

For de farmaceutiske stoffer er erfaringerne meget begrænsede, og skæbnen i det nedre grundvandsmagasin kan ikke vurderes på det eksisterende datagrundlag.

Der er i mange tilfælde fundet problemer med indeklimaet i tilfælde med jordforurening med flygtige stoffer. Der forventes dog ingen problemer med indeklimaet i området nedstrøms lossepladsen, hvis man holder sig mere end 50-100 meter nedstrøms lossepladsens kanter. Dette skyldes den relative enkle geologiske opbygning af de øverste jordlag med cirka ti meter tykke forekomster af smeltevandssand (se afsnit 4.2) og en relativ tynd umættet zone (1-3 meter). Som dokumenteret i afsnit 6.4 vil den lodrette, opadrettede transport af flygtige stoffer bort fra perkolatfanen være begrænset af en pude af rent grundvand hidrørende fra infiltrerende regnvand fra området ovenover perkolatfanen (se figur 8.3). Denne pude vil praktisk talt fjerne den opadrettede diffusion af flygtige stoffer til den umættede zone. Det er således unødvendigt at beskæftige sig yderligere med indeklमारisikoen hidrørende fra perkolatfanen fra Grindsted gamle losseplads.

9 Hvad ved vi – og hvad ved vi ikke?

Dette afsnit er tænkt som et sammendrag af de forrige afsnit og som et baggrundsafsnit for næste kapitel, hvor vi foreslår hvilke yderligere undersøgelser, der kan komme på tale at udføre for at forbedre grundlaget for en risikovurdering af Grindsted gamle losseplads.

Vi ved følgende med ret stor sikkerhed:

- Der er en veldefineret strømningsretning mod nordvest. Den hydrauliske gradient er nedadrettet i hele området, og der er en række - sandsynligvis - sammenhængende barrierer af silt/ler eller brunkul i området.
- Grindsted gamle losseplads indeholder flere hotspots, hvoraf det største har en udstrækning på 1-2 hektar. Affaldet indeholder stadig store mængder kemikalier og udvaskning vil fortsætte med høje koncentrationer i hundredvis af år - med mindre der iværksættes afværgeforanstaltning rettet mod kilden.
- Kemikalierne synes at være deponeret som en del af aktiv kulaffald, og der er ingen information, som tyder på, at der er sket deponering af opløsningsmidler i fri fase (som f.eks. ved tømning fra tromler ud i affaldsgruberne)
- Der måles høje koncentrationer i grundvandet under lossepladsen af en lang række kemikalier (BTEX, klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter af disse, barbiturater og sulfonamider). Der har været mest fokus på det øvre grundvand (< 10 meters dybde) men der er også observationer af, at forureningen er trængt længere ned (>10 meters dybde)
- Der ses en kraftig påvirkning af det terrænnære magasin i nærområdet nordvest for lossepladsen, men fanen er kun kortlagt langs lossepladsens kant.
- Der er påvist et væsentligt potentiale for naturlig nedbrydning af de fleste organiske stoffer fra lossepladsen i det terrænnære magasin ved lossepladsens vestkant.

Vi ved ikke:

- Hvordan de geologiske og hydrauliske forhold er over større dele af området nedstrøms lossepladsen.
- Hvor udbredt hot spot er for sulfonamider, barbiturater og klorerede opløsningsmidler (samt nedbrydningsprodukter af de klorerede opløsningsmidler). Kemikalierne er fundet i prøver af affald og terrænnært grundvand, men omfanget er helt ukendt
- Om der er andre kemikalier end de før nævnte (aniliner), som kunne være relevante at fokusere på
- Om der sker en væsentlig naturlig nedbrydning af kemikalierne i det terrænnære magasin som kunne begrænse faneudbredelsen
- Hvor stor påvirkningen af dybere lag (>10 m.u.t.) er, og om der sker naturlig nedbrydning i disse lag
- Om forureningsfanen/erne vil kunne spores helt ned til Grindsted å, og om der sker opstrømning af forurening til åen.
- Om der er kemiske eller økologiske effekter i åen af en eventuel udsivning

10 Forslag til yderligere undersøgelser

Dette afsnit giver en summarisk oprids af, hvad der kunne igangsættes af yderligere undersøgelser for at forbedre grundlaget for en fornyet risikovurdering af lossepladsen. Forslagene er blevet inddelt i to: hvad der kunne gøres på kort sigt, samt hvad der kunne gøres ved en længerevarende, større indsats.

10.1 Kort sigt

- En gennemgang af Grindstedværkets arkiver i forhold til deponeringen på lossepladsen. Er der stoffer, som er overset? Der kan med fordel tages udgangspunkt i undersøgelser relateret til forureningen på fabriksgrunden og banegravsdepotet. Det vil være optimalt at være opmærksom på deponeringer ved Grindsted gamle losseplads ved disse udredninger.
- Prøvetagning og fuldstændig analyse af alle filtre i GLU1 og GLU2, der er de eneste traditionelle boringer nedstrøms lossepladsen, som er perkolatpåvirkede. Analysepakken bør omfatte en fuld boringskontrol, klorerede opløsningsmidler inkl. nedbrydningsprodukter, BTEX'er og udvalgte farmaceutiske stoffer.
- Etablere 2 boringer ved Grindsted å med 3 filtre for at vurdere potentialeforhold og vandkvalitet ved åen. Der skal etableres dataloggere i boringerne og oplysningerne skal vurderes sammen med potentialeforholdene i Grindsted by (nord for åen) og i åen. Analyserne bør omfatte de samme parametre som i GLU1 og GLU2.
- Vurdering af stofferne i forhold til en evt. kemisk eller økologisk påvirkning af Grindsted å. Det ville være oplagt at gennemføre en generel vurdering af hensyn til forureningen i Grindsted by. Der kan formentlig hentes en del informationer fra undersøgelserne ved Kærgaard Plantage.
- En samlet vurdering af risikoen fra Grindsted gamle losseplads i forhold til Grindsted å og det primære grundvandsmagasin.

10.2 Større indsats

Hvis den foreslåede risikovurdering fører til et ønske om at afklare risikoen i forhold til Grindsted å eller det regionale grundvandsmagasin foreslås følgende undersøgelser:

- Forureningspredningen og den naturlige nedbrydning for de dybe grundvandsfæner kan belyses ved at etablere et transekt på tværs af strømningsretningen 300 m fra lossepladsen. Afhængig af resultaterne kan der etableres endnu et transekt tættere eller længere fra lossepladsen, så fortynding og den naturlige nedbrydning kan belyses. Den naturlige nedbrydning i det dybe magasin kan yderligere belyses ved at etablere boringer langs en strømlinie i retning mod åen.
- Udsivning til åen belyses ved detailundersøgelser i nærområdet på sydsiden af åen og målinger af vandkvaliteten i selve åen. Sådanne aktiviteter skal koordineres med undersøgelser nord for åen.
- Risikovurderingen af det dybe grundvandsmagasin vil kræve opstilling af en regional geologisk model og opsætning af en flowmodel for området. Der bør være særlig fokus på udstrækningen af det dybe lerlag, og igen er en samlet indsats for hele Grindsted området påkrævet.

Indgreb over for forureningsfanen eller selve lossepladsen vil være relevante alternativer, hvis ovenstående fører til en risiko, der fordrer handling. For at belyse om der er realistiske løsningsmuligheder, kan der udarbejdes et afværgekatalog for begge muligheder. For indgreb ved selve lossepladsen skal der være særlig fokus på hotspot området.

11 Referencer

- ¹ Kjeldsen,P., Grundtvig,Aa., Winther,P. & Andersen,J.S. (1998a): Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution source: Landfill history and leachate composition. *Waste Management and Research*, **16**, (1), 3-13.
- ² Grundtvig, Aa. (1993): Udvaskningspotentialet af BTEX fra Grindsted losseplads – Indledende undersøgelser. Forprojekt til eksamensprojekt. Laboratoriet for Teknisk Hygiejne. Danmarks Tekniske Højskole.
- ³ Grundtvig, Aa. (1994): Udvaskningspotentialet af BTEX fra Grindsted losseplads . Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi. Danmarks Tekniske Universitet.
- ⁴ Kjeldsen,P. & Grundtvig,A. (1995a): Leaching of organic compounds from industrial waste disposed of at an old municipal landfill. In: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (eds.): SARDINIA '95, Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Volume III, pp. 201-212. CISA, Cagliari, Italy.
- ⁵ Kjeldsen, P.; Grundtvig, Aa. (1996): Baggrundsundersøgelser for valg af mulige afværgeforanstaltninger ved en gammel losseplads. I: Vintermøde om grundvandsforurening, Vingstedcentret, 5-6 marts. Akademiet for de Tekniske Videnskaber. Lyngby. pp. 33-47.
- ⁶ Šamánková, P.(2006): Risk assessment of contaminated sites - Case study of Grindsted Landfill. Draft for Ph.D. Thesis. University of Brno, Czech Republic.
- ⁷ Boesgaard, P. & Ingildsen, P. (1996): Undersøgelse af strømning i umættet zone på Grindsted Gl. Losseplads: på grundlag af sporstofforsøg, simulering med SWMS-2D og potentialedata. Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi. Danmarks Tekniske Universitet.
- ⁸ Tage Sørensen (1988). Forureningsundersøgelser af Grindsted Kommunes Gamle Losseplads. Status Rapport fase 1, 2 og 3. Dateret april 1988. Udført for Ribe Amtsråd.
- ⁹ Rambøll og Hannemann (1989). Grindsted Gl. Losseplads. Skitseprojektering af afværgeforslag. Dateret December 1989. Udført for Ribe Amtskommune.
- ¹⁰ Heron,G., Bjerg,P.L., Gravesen,P., Ludvigsen,L. & Christensen,T.H. (1998): Geology and sediment geochemistry of a landfill leachate contaminated aquifer (Grindsted, Denmark). *Journal of Contaminant Hydrology*, **29**, 301-317.
- ¹¹ Grøntmij/Carl Bro (2010): Grundvandsmodel for Grindsted By. Rapport til Region Syddanmark.
- ¹² Lind, J. (1994). Stoftransport i nærfeltet af Grindsted gamle losseplads. Instituttet for strømningsmekanik og Laboratoriet for teknisk hygiejne. Eksamensprojekt. Danmark Tekniske Universitet
- ¹³ Barlebo, H. C., Hill, M. C., Rosbjerg, D., & Jensen, K. H. 1998. Concentration data and dimensionality in groundwater models: Evaluation using inverse modelling. *Nordic Hydrology*, **29**, (3), 149-178.
- ¹⁴ Lønborg, M. J., Engesgaard, P., Bjerg, P. L., & Rosbjerg, D. 2006. A steady state redox zone approach for modeling the transport and degradation of xenobiotic organic compounds from a landfill site. *Journal of Contaminant Hydrology*, **87**, (3-4), 191-210.
- ¹⁵ Kjeldsen,P., Bjerg,P.L., Rügge,K., Christensen,T.H. & Pedersen,J.K. (1998b): Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution

- source: Landfill hydrology and leachate migration. *Waste Management and Research*, **16**, (1), 14-22.
- ¹⁶ Petersen, M.J. (2000): Modeling of groundwater flow and reactive transport in a landfill leachate plume, Ph.D. Thesis. Department of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. pp. 1-134. (ISVA Series Paper No. 73).
- ¹⁷ Lanzky, V.F. & Olsen, C. (1999): Nedbrydning af organiske stoffer under Grindsted Gl. Losseplads. Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.
- ¹⁸ Pedersen, O.F. & Schmidt, C.U. (1994): Kortlægning af lossepladsforurening ved poreluftmåling. Eksamensprojekt. Laboratoriet for Teknisk Hygiejne. Danmarks Tekniske Højskole.
- ¹⁹ Pedersen, O.F., Schmidt, C.U., Kjeldsen P., Lindhart, B. & Laier, T. (1995): Kortlægning af lossepladsforurening ved poreluftmåling. *Vand og Jord*, **2**(5), 203-207.
- ²⁰ Kjeldsen, P., Pedersen, O.F., Schmidt, C.U. & Lindhardt, B. (1995b): Delineation of a landfill leachate plume by soil gas surveying. In: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (eds.): SARDINIA '95, Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Volume III, pp. 575-582. CISA, Cagliari, Italy.
- ²¹ Rivett, M. (1995): Soil-gas signatures from volatile chlorinated solvents: Borden field experiments. *Ground Water*, **33**(1), 84-98.
- ²² Davis, G.B. & Barber, C. (1989): Methane volatilization from contaminated groundwater – the effects of recharge. I: Contaminant transport in groundwater. Proceedings of the International Symposium on Contaminant Transport in Groundwater. Stuttgart, 4-6 April. Kobus, H.E., Kinzelbach, W. (eds.). A.A. Balkema. Rotterdam, The Netherlands, 445-450.
- ²³ Bjerg, P.L., Rügge, K., Pedersen, J.K. & Christensen, T.H. (1995): Distribution of redox sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1387-1394.
- ²⁴ Hamburger, N. & Brunstein, T. (1994). Fordeling af kationer ved Grindsted Losseplads. Forprojekt, Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.
- ²⁵ Rügge, K., Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. (1995): Distribution of organic compounds from municipal solid waste in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1395-1400.
- ²⁶ Holm, J.V., Rügge, K., Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. (1995a): Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1415-1420.
- ²⁷ Bjerg, P.L., Rügge, K., Cortsen, J., Nielsen, P.H. & Christensen, T.H. (1999): Degradation of aromatic and chlorinated aliphatic hydrocarbons in the anaerobic part of the Grindsted Landfill leachate plume: In situ microcosm and laboratory batch experiments. *Ground Water*, **37**, 113-121.
- ²⁸ Rügge, K., Bjerg, P.L., Pedersen, J.K., Mosbæk, H. & Christensen, T.H. (1999): An anaerobic field injection experiment in a landfill leachate plume (Grindsted, Denmark), 1. Experimental set-up, tracer movement and fate of aromatic and chlorinated compounds. *Water Resources Research*, **35**, 1231-1246.
- ²⁹ Broholm, M.M., Hunkeler, D., Abe, Y., Jeannotat, S., Aravena, R., Westergaard, C., Jacobsen, C.S. & Bjerg, P.L. (2009): Vurdering af naturlig nedbrydning af PCE i grundvandsmagasinet ved isotopfraktionering. Miljøprojekt nummer 1262, Miljøstyrelsen, København.

Litteratur om Grindsted gammel Losseplads udarbejdet af Danmarks Tekniske Universitet – Alfabetisk liste

- Albrechtsen, H.-J., Bjerg, P.L., Ludvigsen, L., Rügge, K. & Christensen, T.H. (1999): An anaerobic field injection experiment in a landfill leachate plume (Grindsted, Denmark), 2. Deduction of anaerobic (methanogenic, sulfate- and Fe(III)-reducing) redox conditions. *Water Resources Research*, **35**, 1247-1256.
- Barlebo, H. C., Hill, M. C., Rosbjerg, D., & Jensen, K. H. 1998. Concentration data and dimensionality in groundwater models: Evaluation using inverse modelling. *Nordic Hydrology*, **29**, (3), 149-178.
- Baun, A., Jensen, S.D., Bjerg, P.L., Christensen, T.H. & Nyholm, N. (2000): Toxicity of organic chemical pollution in groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **34**, 1647-1652.
- Bjerg, P.L., Albrechtsen, H.-J., Kjeldsen, P., Christensen, T.H. & Cozzarelli, I. (2004): The groundwater geochemistry of waste disposal facilities. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. & Lollar, B.S. (eds.), *Treatise on geochemistry*. Volume 9. Environmental geochemistry, pp. 579-612. Elsevier, Amsterdam.
- Bjerg, P.L., Rügge, K., Cortsen, J., Nielsen, P.H. & Christensen, T.H. (1999a): Degradation of aromatic and chlorinated aliphatic hydrocarbons in the anaerobic part of the Grindsted Landfill leachate plume: In situ microcosm and laboratory batch experiments. *Ground Water*, **37**, 113-121.
- Bjerg, P.L., Rügge, K., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H.-J., Ludvigsen, L., Heron, G. & Christensen, T.H. (1999b): Natural attenuation in a landfill leachate plume: The Grindsted landfill site. In: NATO/CCMS Pilot Study. Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III). 1999 Special Session Monitored Natural Attenuation. Report Number 236, Angers, France, May 9-14, 1999, pp. 5-13. North Atlantic Treaty Organization. <http://www.clu-in.org/download/partner/mna.pdf>
- Bjerg, P.L., Rügge, K., Pedersen, J.K. & Christensen, T.H. (1995): Distribution of redox sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1387-1394.
- Boesgaard, P. & Ingildsen, P. (1996): Undersøgelse af strømning i umættet zone på Grindsted Gl. Losseplads : på grundlag af sporstofforsøg, simulering med SWMS-2D og potentialedata. Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi. Danmarks Tekniske Universitet.
- Grundtvig, Aa. (1993): Udvaskningspotentialet af BTEX fra Grindsted losseplads – Indledende undersøgelser. Forprojekt til eksamensprojekt. Laboratoriet for Teknisk Hygiejne. Danmarks Tekniske Højskole.
- Grundtvig, Aa. (1994): Udvaskningspotentialet af BTEX fra Grindsted losseplads . Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi. Danmarks Tekniske Universitet.
- Heron, G., Bjerg, P.L., Gravesen, P., Ludvigsen, L. & Christensen, T.H. (1998): Geology and sediment geochemistry of a landfill leachate contaminated aquifer (Grindsted, Denmark). *Journal of Contaminant Hydrology*, **29**, 301-317.
- Holm, J.V., Rügge, K., Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. (1995a): Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1415-1420.

Holm, J.V., Bjerg, P.L., Rügge, K. & Christensen, T.H. (1995b): Response to comment on "Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark)". *Environmental Science and Technology*, **29**, 3074.

Jakobsen, R., Albrechtsen, H.-J., Rasmussen, M., Bay, H., Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. (1998): H₂ concentrations in a landfill leachate plume (Grindsted, Denmark): In situ energetics of terminal electron acceptor processes. *Environmental Science and Technology*, **32**, 2142-2148.

Jensen, D.L., Boddum, J.K., Redemann, S. & Christensen, T.H. (1998): Speciation of dissolved iron(II) and manganese(II) in a groundwater pollution plume. *Environmental Science and Technology*, **32**, 2657-2664.

Kjeldsen, P., Grundtvig, A., Winther, P. & Andersen, J.S. (1998a): Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution source: Landfill history and leachate composition. *Waste Management and Research*, **16**, (1), 3-13.

Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Rügge, K., Christensen, T.H. & Pedersen, J.K. (1998b): Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution source: Landfill hydrology and leachate migration. *Waste Management and Research*, **16**, (1), 14-22.

Kjeldsen, P.; Grundtvig, A. (1996): Baggrundsundersøgelser for valg af mulige afværgeforanstaltninger ved en gammel losseplads. (Background investigations for the selection of possible remedial actions at an old landfill site, in Danish). In: Vintermøde om grundvandsforurening, Vingstedcentret, 5-6 marts. Akademiet for de Tekniske Videnskaber. Lyngby. pp. 33-47.

Kjeldsen, P. & Grundtvig, A. (1995a): Leaching of organic compounds from industrial waste disposed of at an old municipal landfill. In: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (eds.): SARDINIA '95, Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Volume III, pp. 201-212. CISA, Cagliari, Italy.

Kjeldsen, P., Pedersen, O.F., Schmidt, C.U. & Lindhardt, B. (1995b): Delineation of a landfill leachate plume by soil gas surveying. In: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (eds.): SARDINIA '95, Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Volume III, pp. 575-582. CISA, Cagliari, Italy.

Lanzky, V.F. & Olsen, C. (1999): Nedbrydning af organiske stoffer under Grindsted Gl. Losseplads. Eksamensprojekt. Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.

Lind, J. (1994): Stoftransport i nærfeltet af Grindsted gamle losseplads : 3 dimensional ikke-stationær modellering af konservativ stoftransport med SHE-modellen under anvendelse af resultater fra feltforsøg. Eksamensprojekt. Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning og Laboratoriet for Teknisk Hygiejne. Danmarks Tekniske Universitet.

Lønborg, M. J., Engesgaard, P., Bjerg, P. L., & Rosbjerg, D. 2006. A steady state redox zone approach for modeling the transport and degradation of xenobiotic organic compounds from a landfill site. *Journal of Contaminant Hydrology*, **87**, (3-4), 191-210.

Ludvigsen, L., Albrechtsen, H. J., Holst, H., & Christensen, T. H. 1997. Correlating phospholipid fatty acids (PLFA) in a landfill leachate polluted aquifer with biogeochemical factors by multivariate statistical methods. *Fems Microbiology Reviews*, **20**, 447-460.

Ludvigsen, L. (1998): Mikrobielle redoxprocesser i lossepladsforurenede grundvand. Ph.D.-afhandling. Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby. pp. 1-77 + appendix.
OBS – ingen pdf-fil

Ludvigsen, L., Albrechtsen, H.-J., Heron, G., Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. (1998): Anaerobic microbial redox processes in a landfill leachate contaminated aquifer (Grindsted, Denmark). *Journal of Contaminant Hydrology*, **33**, 273-291.

Ludvigsen,L., Albrechtsen,H.-J., Ringelberg,D., Ekelund,F. & Christensen,T.H. (1999): Distribution and composition of microbial populations in a landfill leachate contaminated aquifer (Grindsted, Denmark). *Microbial Ecology*, **37**, (3), 197-207.

Pedersen, O.F. & Schmidt. C.U. (1994): Kortlægning af lossepladsforurening ved poreluftmåling. Eksamensprojekt. Laboratoriet for Teknisk Hygiejne. Danmarks Tekniske Højskole.

Pedersen, O.F., Schmidt. C.U., Kjeldsen P., Lindhart, B. & Laier, T. (1995): Kortlægning af lossepladsforurening ved poreluftmåling. *Vand og Jord*, **2**(5), 203-207

Petersen,M.J. (2000): Modeling of groundwater flow and reactive transport in a landfill leachate plume, Ph.D. Thesis. Department of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. pp. 1-134. (ISVA Series Paper No. 73).

OBS – ingen pdf-fil

Rügge,K. (1997): Fate of xenobiotic compounds downgradient of the Grindsted Landfill, Denmark: An anaerobic field injection experiment. Ph.D. Thesis. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby. pp. 1-31 + appendix.

OBS – ingen pdf-fil

Rügge,K., Bjerg,P.L. & Christensen,T.H. (1995): Distribution of organic compounds from municipal solid waste in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science and Technology*, **29**, 1395-1400.

Rügge,K., Bjerg,P.L., Mosbæk,H. & Christensen,T.H. (1999a): Fate of MCPP and atrazine in an anaerobic landfill leachate plume (Grindsted, Denmark). *Water Research*, **33**, 2455-2458.

Rügge,K., Bjerg,P.L., Pedersen,J.K., Mosbæk,H. & Christensen,T.H. (1999b): An anaerobic field injection experiment in a landfill leachate plume (Grindsted, Denmark), 1. Experimental set-up, tracer movement and fate of aromatic and chlorinated compounds. *Water Resources Research* , **35**, 1231-1246.

Rügge,K., Hofstetter,T.B., Haderlein,S.B., Bjerg,P.L., Knudsen,S., Zraunig,C., Mosbæk,H. & Christensen,T.H. (1998): Characterization of predominant reductants in an anaerobic leachate-affected aquifer by nitroaromatic probe compounds. *Environmental Science and Technology*, **32**, 23-31.

Pavlna Šamánková, P.(2006): Risk assessment of contaminated sites - case study of Grindsted Landfill. Draft for Ph.D. Thesis. University of Brno, Czech Republic.

Danmarks Tekniske Universitet (DTU) gennemførte i perioden 1991 – 98 flere større forskningsprojekter. Projekterne havde som overordnet formål at studere grundvandsforureningen fra en dansk losseplads samt den naturlige nedbrydning af væsentlige forureningskomponenter i grundvandszonen. Projekterne blev gennemført med Grindsted gamle Losseplads som udgangspunkt.

Formålet med denne rapport er at præsentere en kort, dansk sammenfatning af alle DTU's resultater fra undersøgelserne på Grindsted gamle losseplads samt at give en fremadrettet anbefaling af, hvad Region Syddanmark bør fokusere på i det videre arbejde med at kortlægge risikoen relateret til forureningen fra lossepladsen.

DTU Miljø
Institut for Vand og Miljøteknologi

Danmarks Tekniske Universitet
Miljøvej, bygning 113
2800 Kgs. Lyngby

Tlf: 4525 1600
Fax: 4593 2850

E-post: reception@env.dtu.dk
www.env.dtu.dk

ISBN 978-87-91855-77-1