

Miljøprojekt Nr. 805 2003
Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening.

Passiv ventilation til fjernelse af PCE fra den umættede zone - Hovedrapport

Anders G. Christensen, Henrik H. Nielsen og
Erling V. Fischer
NIRAS Rådgivende Ingeniører og Planlæggere

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

FORORD	9
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	11
SUMMARY AND CONCLUSIONS	15
1 INDLEDNING	19
1.1 BAGGRUND	19
1.2 FORMÅLET MED TEKNOLOGIUDVIKLINGSPROJEKTET	19
1.3 RAPPORTENS OPBYGNING	19
2 VIRKEMÅDE OG TEORETISK GRUNDLAG	21
2.1 GENEREL BESKRIVELSE AF VIRKEMÅDE FOR PASSIV VENTILATION	21
2.2 TEORETISK BESKRIVELSE AF TRYK- OG FLOW VED PASSIV VENTILATION	23
2.3 EKSEMPLER PÅ ESTIMATION AF PARAMETRE UD FRA TIDSSERIER	25
2.4 HISTORISKE OBSERVATIONER AF ATMOSFÆRETRYKKET	27
2.5 UDNYTTELSE AF VARIATIONER I ATMOSFÆRETRYK TIL OPRENSNINGSFORMÅL I USA	28
2.6 OPBYGNINGS- OG ANLÆGSKOMPONENTER FOR SYSTEM TIL PASSIV VENTILATION	30
3 DESIGN AF PROTOTYPE-SYSTEM	33
3.1 RESULTATER FRA INDLEDENDE PILOTFORSØG	33
3.2 KRAVSPECIFIKATIONER TIL ENKELTKOMPONENTER	33
3.3 SAMLET BESKRIVELSE AF PROTOTYPE-SYSTEMET	34
3.4 FORVENTEDE SPECIFIKATIONER FOR PROTOTYPE DESIGNET	34
3.5 SKØNNET INFLUENSRADIUS UDFRA PILOTFORSØG	37
4 BESKRIVELSE AF FELTLOKALITETER	39
4.1 GENERELT OM VALG AF LOKALITETER	39
4.2 OVERORDNET MÅLEPROGRAM	40
4.3 PRINS VALDEMARS ALLE 14 OG AMTSVEJ 2-4, ALLERØD	40
4.3.1 <i>Geologi og hydrogeologi</i>	40
4.3.2 <i>Forureningsbeskrivelse</i>	40
4.3.3 <i>Massebalance for PCE</i>	40
4.3.4 <i>Installation af anlægskomponenter</i>	42
4.3.5 <i>Instrumentering</i>	42
4.4 NYGADE 37, FAKSE	42
4.4.1 <i>Geologi og hydrogeologi</i>	42
4.4.2 <i>Forureningsbeskrivelse</i>	43
4.4.3 <i>Massebalance for PCE</i>	43
4.4.4 <i>Installation af anlægskomponenter</i>	43
4.4.5 <i>Instrumentering</i>	45
4.5 MØLLEVEJ 12, ASKOV	48
4.5.1 <i>Geologi og hydrogeologi</i>	48
4.5.2 <i>Forureningsbeskrivelse</i>	48
4.5.3 <i>Massebalance for PCE</i>	48
4.5.4 <i>Installation af anlægskomponenter</i>	48

4.5.5	<i>Instrumentering</i>	50
5	RESULTATER	53
5.1	MØLLEVEJ 12, ASKOV	53
5.1.1	<i>Luftflow</i>	53
5.1.2	<i>Poreluftkoncentrationer</i>	57
5.1.3	<i>Massejernelsesrate</i>	61
5.1.4	<i>Tracerforsøg</i>	62
5.1.5	<i>Grundvandsanalyser</i>	64
5.1.6	<i>Samlet massebalance</i>	64
5.2	NYGADE 37, FAKSE	64
5.2.1	<i>Luftflow fra passivt ventilerende boringer</i>	65
5.2.2	<i>Luftflow fra aktivt system</i>	67
5.2.3	<i>Poreluftkoncentrationer</i>	69
5.2.4	<i>Massejernelsesrate</i>	71
5.2.5	<i>Tracerforsøg</i>	72
5.2.6	<i>Samlet massebalance</i>	74
5.3	PRINS VALDEMARS ALLE 14, ALLERØD	75
5.3.1	<i>Luftflow</i>	75
5.3.2	<i>Poreluftkoncentrationer</i>	79
5.3.3	<i>Massejernelsesrate</i>	82
5.3.4	<i>Grundvandsanalyser</i>	83
5.3.5	<i>Samlet massebalance</i>	84
5.4	AMTSVEJ 2-4, ALLERØD	85
5.4.1	<i>Luftflow</i>	86
5.4.2	<i>Poreluftkoncentrationer</i>	89
5.4.3	<i>Massejernelsesrate</i>	92
5.4.4	<i>Grundvandsanalyser</i>	93
5.4.5	<i>Samlet massebalance</i>	94
6	DISKUSSION	97
6.1	ANLÆGSKOMPONENTER	97
6.1.1	<i>Prototype-systemet</i>	97
6.1.2	<i>System med længere rørføringer før afkast</i>	98
6.1.3	<i>System med mini vakuum pumpe</i>	99
6.2	DRIFT OG MONITERING	99
6.2.1	<i>Funktionskontrol af anlæg</i>	99
6.2.2	<i>Løbende måling af nøgleparametre</i>	100
6.2.3	<i>Eksempel på drifts- og monitoringsinstruks</i>	101
6.3	OPNÅEDE OPRENSNINGSEFFEKTER PÅ DE 4 LOKALITETER	101
6.3.1	<i>Poreluft-volumen afkastet</i>	101
6.3.2	<i>PCE-masse fjernet fra den umættede zone</i>	103
6.3.3	<i>Ændringer i poreluftforureningens styrke og udbredelse</i>	104
6.3.4	<i>Ændringer i grundvandskoncentrationer</i>	105
6.3.5	<i>Boringsafstande og realiserede luftflow i forhold til designet</i>	106
6.3.6	<i>Vurdering af influensradius og strømningsforhold generelt</i>	107
6.4	DIMENSIONERING AF FREMTIDIGE ANLÆG TIL PASSIV VENTILATION	109
6.4.1	<i>Hydrogeologiske forhold</i>	109
6.4.2	<i>Forureningstyper og begrænsninger</i>	109
6.4.3	<i>Vurdering af boringsantal og -afstand</i>	110
7	ANLÆGS- OG DRIFTSØKONOMI	111
7.1	ANLÆGSOMKOSTNINGER	111
7.1.1	<i>Prins Valdemars Alle og Amtsvej, Allerød</i>	111
7.1.2	<i>Nygade 37, Fakse</i>	112

7.1.3	<i>Møllevej 12, Askov</i>	113
7.1.4	<i>Projekteringsomkostninger</i>	114
7.2	DRIFTSOMKOSTNINGER	114
7.3	SAMMENFATTENDE OM ANLÆGS- OG DRIFTSOMKOSTNINGER	115
8	REFERENCER	117

BILAG

Bilag 1 - Prototype system

- 1.1 Beskrivelse af funktionelle krav
- 1.2 Leverandør og forhandlerliste samt datablad for GAC (WS 42)
- 1.3 Tryktab i filter og blindrør
- 1.4 Tryktab i overgangs-/moniteringsstykke
- 1.5 Tryktab i BaroBall og In-line ventil
- 1.6 Tryktab og hastighedsfordeling i kulfilter
- 1.7 B-værdier

Bilag 2 – Prins Valdemars Alle 14, Allerød

- 2.1 Situationsplan
- 2.2 Boreprofiler og vandmætning
- 2.3 Tidsserie for atmosfæretryk og differenstryk
- 2.4 Tidsserie for atmosfæretryk og luftflow
- 2.5 Tidsserier for temperatur i målebrønd PV4
- 2.6 Luftflow ud af borer
- 2.7 Koncentrationsmålinger i de enkelte filtre
- 2.8 Ændringer i poreluftforureningens horisontale udbredelse
- 2.9 Massefjernelsesrater og akkumuleret PCE-mængde fjernet
- 2.10 Analyseresultater for vandprøver
- 2.11 Analyseresultater for kul fra GAC-enheder

Bilag 3 – Amtsvej 2-4, Allerød

- 3.1 Situationsplan
- 3.2 Boreprofiler og vandmætning
- 3.3 Tidsserie for atmosfæretryk og differenstryk
- 3.4 Tidsserie for atmosfæretryk og luftflow
- 3.5 Tidsserier for temperatur i målebrønd PV11
- 3.6 Luftflow ud af borer
- 3.7 Koncentrationsmålinger i de enkelte filtre
- 3.8 Ændringer i poreluftforureningens horisontale udbredelse
- 3.9 Massefjernelsesrater og akkumuleret fjernet PCE-mængde
- 3.10 Analyseresultater for vandprøver
- 3.11 Analyseresultater for kul fra GAC-enheder

Bilag 4 – Nygade 37, Fakse

- 4.1 Situationsplan
- 4.2 Boreprofiler og vandmætning
- 4.3 Specifikationer for aktivt system. Anlægsdele og leverandører.
- 4.4 Atmosfæretryk og differenstryk i referenceboringer (B102-Kalk og B102-Sand)
- 4.5 Luftflow ud af borer
- 4.6 Aktivt system. Strømindladning fra solceller og vindgenerator
- 4.7 Koncentrationsmålinger i de enkelte filtre
- 4.8 Ændringer i poreluftforureningens horisontale udbredelse
- 4.9 Massefjernelsesrater og akkumuleret PCE-mængde fjernet
- 4.10 Tracerforsøg på boring SB2-Sand

Bilag 5 – Møllevej 12, Askov

- 5.1 Situationsplan
- 5.2 Boreprofiler
- 5.3 Atmosfæretryk, differenstryk og grundvandstand
- 5.4 Luftflow ud af borer

- 5.5 Koncentrationsmålinger i filtre
- 5.6 Ændring i poreluftforureningens horisontale udbredelse
- 5.7 Massefjernelsesrater
- 5.8 Tracerforsøg i boring PV2-1 Øvre filter
- 5.9 Vandanalyser fra monitoringsboringer

Bilag 6 – Drift og monitorering

- 6.1 Eksempel på skemaer – drift og monitorering

Forord

På baggrund af et stigende antal fund af chlorerede opløsningsmidler i grundvandet samler interessen sig om at undersøge nye og eksisterende afværgeteknikkers anvendelighed over for denne stofgruppe. På mange lokaliteter påvises stofferne i den umættede zone, hvor de kan udgøre en vedvarende kilde til grundvandsforurening, idet stofferne opløses i det infiltrerende porevand og transporteres til de underliggende grundvandsmagasiner.

Passiv Ventilation har som afværgeteknik vundet frem i de senere år, specielt i USA. Teknikken har primært været benyttet til fjernelse af flygtige organiske komponenter (VOC's) fra den umættede zone. Ved Passiv Ventilation (Engelsk: Passive Soil Vapor Extraction) anvendes der i modsætning til den velkendte aktive vakuumventilation ikke mekanisk ventilering med en vakuumpumpe. I stedet udnyttes udelukkende de naturligt forekommende trykgradienter i jorden, der skyldes ændringer i lufttrykket i forbindelse med passage af vejrfroster.

Afværgeteknikken baseret på Passiv Ventilation (PV) har ved pilotforsøg vist lovende resultater, men der er endnu kun sparsomme erfaringer med anvendelse af teknikken. I Danmark har teknikken således endnu ikke været implementeret og dokumenteret i fuld skala. For at dokumentere teknologien under danske forhold, er der under Miljøstyrelsens Teknologiprogram og i samarbejde med Storstrøms, Frederiksborg og Ribe Amter gennemført en afprøvning af teknikken på 4 lokaliteter. Projektet har været fulgt af en følgegruppe bestående af Henrik Østergaard, Frederiksborg Amt, Henrik Sørensen, Storstrøms Amt, Jesper Østergaard, Ribe Amt, Inger Asp Fuglsang, Miljøstyrelsen og den faglige sekretær Thomas Larsen, Hedeselskabet Energi & Miljø A/S.

Kendetegnende for lokaliteterne er, at de alle er tidligere renserigrunde, hvor der under driften er sket en forurening af den umættede zone, samt i visse tilfælde også grundvandszonen, med chlorerede opløsningsmidler.

En stor tak rettes til specielt Wayne Downs fra Brigham-Young University, Utah og til Joe Rossabi fra Westinghouse Savannah River Company, S. Carolina for deres støtte og diskussioner undervejs. Herudover rettes en stor tak til Virginia Rohay, CH2M Hill Hanford Inc., Washington, for rådgivning specielt vedrørende brugen af kulfiltre til passiv ventilation.

Arbejdet er udført af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S.

Sammenfatning og konklusioner

På baggrund af et stigende antal fund af chlorerede opløsningsmidler i grundvandet, samler interessen sig om at undersøge nye og eksisterende afværgeteknikkers anvendelighed over for denne stoftype. Afværgeteknikken baseret på passiv ventilation (PV) har ved gennemførte pilotforsøg vist lovende resultater. Metoden er oprindeligt udviklet i USA, og er her afprøvet over for en række forskellige forureningstyper og med forskellige konfigurationer af boringer.

For at dokumentere teknikken under danske forhold, er der under Miljøstyrelsens teknologiprogram og i samarbejde med Storstrøms, Frederiksborg og Ribe amter igangsat en afprøvning af teknikken på 4 lokaliteter, alle tidligere renserigrunde forurenet med PCE. På alle lokaliteter er der under et dæklag af ler påvist en umættet zone af permeabelt sand/grus, hvortil der er sket et gennembrud af PCE. Der er således på alle lokaliteter påvist en kraftig og udbredt poreluftforurening.

Ved PV udnyttes de naturligt forekommende trykgradienter mellem atmosfæren og den umættede zone til at drive forurenet poreluft til terræn via filtersatte boringer. Metoden kan anvendes over for flygtige stoffer som fx PCE og andre chlorerede forbindelser, den flygtige del af benzinprodukter, herunder MTBE, samt methan fra lossepladser. Alternativt er det muligt at styre luftflowet ned i boringer, hvorved iltholdigt atmosfærisk luft kan tilføres den umættede zone. Herved stimuleres den aerobe mikrobiologiske nedbrydning af oliekomponenter, og metoden betegnes i dette tilfælde ”passiv bioventing”.

I Danmark skyldes variationerne i atmosfæretrykket primært passage af høj- og lavtryk, og kun sekundært temperaturvariationer i atmosfæren. Variationerne i selve atmosfæretrykket er generelt små (få procent), men sker over store områder og indeholder en betydelig energimængde. Størrelsen af trykgradienten mellem atmosfæren og den umættede zone afhænger bl.a. af den overliggende jords tykkelse og permeabilitet. Metoden kræver således, at der findes et terrænnært lavpermeabelt lag af fx. moræner. Denne trykgradient og permeabiliteten af selve den umættede zone, der ønskes ventileret, er de styrende parametre for størrelsen af det luftflow, som kan opnås. I rapporten er teorien og de styrende ligninger samt relevante fysiske parametre bag PV beskrevet, og det er trin for trin vist, hvordan disse parametre kan bestemmes ud fra pilotforsøg. Endvidere er det vist, hvordan det gennemsnitlige luftflow fra en passivt ventilerende boring kan beregnes ud fra bl.a. en historisk tidsserie for atmosfæretrykket og de fysiske parametre bestemt ved pilotforsøg.

Der er udviklet et prototype-system til PV bestående af en boring, filtersat i den umættede zone, et aktivt kulfilter til at rense poreluften før afkast og en en-vejs-ventil, der kun tillader udstrømning af poreluft fra boringen. De enkelte komponenters tryktab er beregnet og målt i laboratoriet, og det er efterfølgende ved målingerne på de enkelte lokaliteter dokumenteret, at systemet som helhed har et meget lavt tryktab ($<0,5$ mBar) og yder en ubetydelig reduktion af det naturlige luftflow. Det udviklede kulfilter kan

tilbageholde ca. 450 gram PCE, før der registreres gennembrud. Alle de anvendte komponenter har vist sig at være robuste, og det vurderes at være tilstrækkeligt at tilse systemerne en gang årligt for funktion. Er der meget høje koncentrationer af PCE i den udstrømmende poreluft, kan det være nødvendigt med halvårlige tilsyn og kulsift.

Det gennemsnitlige årlige luftflow fra en PV-boring varierer fra 0,2 til 1,1 m³/t. Antallet af udstrømningsperioder er ca. 180 pr. år, og har en gennemsnitlig varighed på 13-25 timer. Den maksimale varighed af en udstrømningsperiode er ca. 4,5 dage og det maksimalt registrerede luftflow er ca. 32 m³/t. Der foregår en udstrømning af poreluft i 40-50% af tiden, svarende til at differensstrykket statistisk set er positivt i 50% af tiden. Det maksimale differenstryk er ca. +/- 11 mBar, og er registreret i forbindelse med et ekstremt hurtigt atmosfærisk trykfald. På lokaliteten i Askov er de største flow registeret, og det samlede årlige luftflow fra systemets 9 filtre er ca. 0,2 mill. m³/år, svarende til et gennemsnitsflow på 23,7 m³/t. Under et ekstremt hurtigt atmosfærisk trykfald er der registeret et kortvarigt flow på ca. 250 m³/t, hvilket er i samme størrelsesorden som for et aktivt system med elektriske vakuumpumper. Den totale udstrømmede poreluftmængde på de enkelte grunde indikerer, at der er sket en luftudskiftning i den umættede zone svarende til mellem 25 og 100 porevolumener i løbet af 2 år.

På de enkelte lokaliteter, har startkoncentrationerne for PCE i poreluften i gennemsnit ligget på mellem 100 og 300 mg PCE/m³. I løbet af ca. 18-24 mdr.s drift er der sket en reduktion i gennemsnitskoncentrationen på 50-85%, men med en stor variation mellem de individuelle filtre. Således udviser nogle filtre en reduktion op til 96%. I gennemsnit er koncentrationerne på de enkelte lokaliteter reduceret til mellem 30 og 120 mg PCE/m³, med det laveste gennemsnitsniveau opnået i Askov, hvor det største flow, men også mindste antal porevolumenudskiftninger er målt. Den tidlige udvikling i koncentrationsniveauet er tilnærmelsesvis eksponentiel. Der kan således beregnes en halveringstid for det gennemsnitlige fald i koncentrationen på 7 mdr. for Askov-lokaliteten, mens den er op til 28 mdr. for de øvrige. Den horisontale udbredelse af områder med høje PCE-koncentrationer (>50-100 mg PCE/m³) er reduceret væsentligt, og der er således tydelig indikation på en effekt af driften. I områder med lave udgangs-koncentrationer ses kun en svag reduktion. Kun i enkelte filtre ses stigende koncentrationer mod slutningen af måleperioden, hvilket skyldes en stigende grundvandsstand og dermed en reduceret mægtighed af den umættede zone, og som følge heraf et mindre eller helt fraværende luftflow.

Den samlede fjernelse af PCE i løbet af de to driftsår på de fire lokaliteter er hhv. 2-3, 5, 8 og 50-60 kg. Den største fjernelse af PCE ses i Askov. Hertil kommer en mindre mængde nedbrydningsprodukter af PCE, svarende til ca. 1-5 % af den fjernede PCE-mængde. Den årlige fjernelsesrate for systemerne efter 2-4 års drift vurderes at blive 0,1-1 kg PCE/år, hvilket nogenlunde modsvarer den skønnede nedsivning til den umættede zone, beregnet ud fra de eksisterende data. Sammen-fattende vurderes det således, at de eksisterende systemer på sigt er i stand til dels fortsat at fastholde det nuværende reducerede koncentrationsniveau, og sandsynligvis reducere koncentrationerne yderligere, og herved reducere massefluksen til grundvandet væsentligt.

På lokaliteten i Askov vurderes det, at massefluksen til grundvandet er reduceret i løbet af de 2 første driftsår, idet koncentrationen af PCE i

grundvandet direkte under en af de passivt ventilerende boringer er faldet fra 300 µg/l til 20 µg/l. Dette vurderes også at være i god overensstemmelse med at der er fjernet over 50 kg PCE fra den umættede zone. En tilsvarende tendens i grundvandet er observeret på en anden af feltlokaliteterne.

På lokaliteten i Fakse, er der ved to boringer foretaget målinger i kalken. Der er påvist et gennemsnitligt luftflow af samme størrelse og med samme udstrømnings-forløb som fra filtrene i sandlaget på grunden. I den ene boring har der også været monteret en mini 12V-vakuumpumpe, der har været drevet af et system af solceller og en lille vindmølle placeret på grunden. Det gennemsnitlige årlige flow har været ca. 1 m³/t, og fra denne og en yderligere boring er der totalt fjernet ca. 0,25 kg PCE. Denne pumpe har ydet 5 gange mere end hvad der er strømmet ud alene ved passivt flow, og dette viser, at det er muligt på en enkel måde at forøge det naturlige flow ved hjælp af elektrisk energi udvundet fra andre former for vedvarende energikilder. Systemet har kørt meget stabilt, men prisen (65.000 kr.) for systemet er relativt høj i forhold den opnåede merydelse. Da solcellerne relativt har bidraget med 80% af den samlede effekt, vurderes det, at eventuelle fremtidige systemer alene bør drives af solceller koblet direkte på pumpen, så unødigt elektronik undgås, og der samtidig opnås en væsentlig besparelse.

På projektlokaliteterne har der været anvendt en forventet "influenradius", svarende til en boringsafstand på 15 m. I praksis har der været anvendt afstande mellem de enkelte boringer på mellem 7 og 20 m, størst i Askov og mindst i Fakse. For alle lokaliteter ses der aftagende koncentrationer over tid, men der er ikke nogen simpel sammenhæng mellem fx boringsafstand eller antallet af porevolumener udskiftet og den opnåede effekt. Beregnes "influenradius" som den horisontale afstand, hvorfra en PV-boring opsamler luften, og anvendes det gennemsnitlige afkastede luftvolumen for alle udstrømningshændelser, kan "influenradius" beregnes til mellem 1 m (Fakse) og 4 m (Askov). Med samme fremgangsmåde kan det beregnes, at en PV-boring under den største enkelt-udstrømningsperiode (volumenmæssigt) har opsamlet luft fra mellem 3 m (Fakse) og 10 m (Askov). De gennemførte tracerforsøg indikerer generelt en større transportafstand end beregningerne ovenfor, og dette skyldes sandsynligvis en vis heterogenitet i den vertikale permeabilitet i den umættede zone.

Ved design af fremtidige systemer bør der, hvis startkoncentrationerne er større end ca. 50-100 mg PCE/m³, gennemføres en indledende fase med aktiv ventilation, hvorved den evt. akkumulerede forureningsmasse hurtigt kan reduceres væsentligt. Når fjernelsesraten ved den aktive fjernelse stabiliseres, oftest efter få uger eller måneder, kan der skiftes til passiv ventilation. For grunde med relativt høje naturlige luftflow (> 2 m³/t) foreslås det at anvende en boringsafstand på 15 m, mens der for naturlige luftflow mellem 0,5 og 2 m³/t kan anvendes en boringsafstand på 10 m. Endelig vil en boringsafstand på 5 m kunne anvendes, hvor det naturlige luftflow er meget lavt (<0,5 m³/t). Generelt anbefales det primært at placere PV-boringerne i kildeområdet for det overliggende lavpermeable materiale, således at der fokuseres på at opsamle PCE'en der, hvor den bevæger sig ind i den umættede zone.

Anlægsinvesteringerne for et standardssystem med 5-6 PV-boringer, som det, der er implementeret på de to lokaliteter i Allerød, har pr. grund været ca. 200.000 kr., ekskl. moms. Afhængig af den eksakte konfiguration, koster en PV-boring til 20 m, inklusiv kulfilter, således ca. 35-40.000 kr., ekskl. moms. Findes der eksisterende boringer, som kan konverteres til PV, kan udgiften

begrænses til en brønd med tilhørende kulfilter, svarende til en udgift på ca. 15-20.000 kr., ekskl. moms. For et system som i Askov med 6 boringer uden kulfiltre og afkast ført til tagryg, har den samlede udgift været 190.000 kr., ekskl. moms, og således ikke væsentlig forskellig fra designet med kulfiltre. For PV-systemet (ikke medregnet det aktive system med solceller mv.) implementeret i Fakse, med 8 filtre i sandlaget og 2 i kalken, har den samlede udgift været 260.000 kr., ekskl. moms. Et pilotforsøg med passiv ventilation kan typisk gennemføres for 45-90.000 kr., ekskl. moms, afhængig af det ønskede detaljeringsniveau og afhængigt af, om der findes en boring, der kan anvendes direkte. Projektering af et standard PV-system vil typisk kunne gennemføres for 30-60.000 kr., ekskl. moms.

Driftsudgifterne til standardsystemet med kulfilter er relativt lave, idet det vil være tilstrækkeligt at gennemføre en årlig funktionskontrol. I forbindelse hermed kan der gennemføres målinger af de aktuelle koncentrationer i hvert filter, og kulfiltre med gennembrud kan udskiftes. Dette årlige besøg, inklusive udskiftning af seks kulfiltre og en kort rapport, kan gennemføres for ca. 45.000 kr., ekskl. moms., afhængig af antallet af kulfiltre med gennembrud. Udelades koncentrations-målingerne, kan de årlige driftsudgifter reduceres til ca. 20-25.000 kr., ekskl. moms.

Summary and conclusions

The detection frequency of chlorinated solvents in the Danish ground water is still increasing, and consequently there is a growing interest to investigate the effectiveness of new as well as existing remediation techniques to reduce the content of these components. Several pilot tests of the new remediation technique passive ventilation (PV) have shown promising results. Originally, this method was developed in USA, and here it was tested in a number of different types of pollution, using different well configurations. To document the technique under Danish conditions, the technique is now being tested at 4 localities, all former dry-cleaning sites polluted with PCE. The project is a co-operation between the counties of Storstrøm, Frederiksborg and Ribe under the Danish EPA's technology demonstration programme). At all 4 localities, a sandy and highly permeable unsaturated zone polluted with PCE was found under a cover layer of clay. This permeable and confined strata resulted in an extensive and wide spread soil gas pollution.

Using PV, the natural pressure gradients between the atmosphere and the unsaturated zone are utilised to force the polluted soil gas to the ground surface through wells screened across the unsaturated zone. The method can be used to reduce volatile components, i.e. PCE, and other chlorinated compounds, more volatile fractions of petrol products, including MTBE, as well as methane from waste dumps. Alternatively, it will be possible to direct the airflow down wards in wells, which allows adding atmospheric air containing oxygen into the unsaturated zone. Hereby, the aerobic micro-biological degradation of oil components is stimulated, and the method is called "passive bio-venting".

In Denmark, the variations in the atmospheric pressure are primarily caused by the passage of weather systems with high and low pressures, and secondary by variations in the temperature of the atmosphere. Generally, there are only small variations in the atmospheric pressure. However, these variations are spread over extensive areas and contains a huge amount of energy. The size of the vertical pressure gradient in the subsurface, depends to a certain extent on the thickness and permeability of the overlying soil, and this is the reason why the method is dependent on a low permeable layer of clay near the surface. The pressure gradient across the low permeability layer, the permeability and thickness of the unsaturated zone to be ventilated, are the controlling parameters for the size of airflow to be achieved. The theory and controlling mathematical equations as well as relevant physical parameters behind the PV technique are described in this report. It is further shown step by step how these parameters can be estimated from pilot tests. Furthermore, it is shown how the average airflow from a passive ventilating well can be calculated from a historical time series of atmospheric pressure and physical parameters from pilot tests.

A proto type system for PV has been developed, consisting of a well screened across the unsaturated zone, an GAC-unit (Granular Activated Carbon) for cleaning of the soil gas before discharge, and a one-way valve allowing only discharge of soil gas from the well. The pressure loss of the individual components has been calculated and measured in a laboratory, and

subsequent measurements at the individual sites have documented that the pressure loss through the total system is very low (< 0.5 mBar), and generally only contributes to an insignificant reduction of the natural airflow. The developed GAC-unit can restrain approx. 450 g PCE, before a break through can be detected. All components applied so far have proven to be durable, and it is assessed that one yearly inspection should be sufficient. However, in case of very high concentrations of PCE in the soil gas discharged, inspection and exchange of the GAC-unit every 6 months can be necessary.

The average airflow over a year from a PV well varies from $0.2 - 1.1$ m³/h. The number of discharge periods is approximately 180/year, with an average duration of 13-25 hours. The maximum duration of a discharge period is approx. 4.5 days, and the highest peak airflow registered being approximately 32 m³/h. There is a continuous discharge of soil gas 40-50% of the time, equivalent to a statistically positive differential pressure in 50% of the time. The maximum differential pressure measured is approx. ± 11 mBar, and was registered during an extremely rapid fall in the atmospheric pressure. The largest flows are registered at the locality in Askov, and the total airflow from the system's 9 filters is approx. 0.2 mio. m³/year, corresponding to an average flow of 23.7 m³/h. A total peak flow for the system of approximately 250 m³/h, which equals the amount for a typical active SVE-system driven by electrical vacuum pumps, was registered during an extremely rapid fall in the atmospheric pressure. The total amount of soil gas discharged at the individual sites over 2 years indicates, that the pore volume turnover rate for the unsaturated zone is between 25 and 100 times.

At the individual localities, the start concentrations of PCE in the soil gas air have shown an average of $100 - 300$ mg PCE/m³. During the 18-24 months of operation, there has been a reduction in the average concentration of 50-85%, but with great variations between the individual filters. Thus some of the filters show reductions up till 96%. On an average, the concentrations in the individual localities have been reduced to $30 - 120$ mg PCE/m³. The lowest level achieved in Askov, where the largest flow, but also the lowest pore volume turnover rate was measured. The development over time of the level of concentration is exponential. Thus, the average half-life period of the decrease in the concentrations for the Askov locality can be calculated to be 7 months, whereas the half-life periods for the other localities are estimated at approximately 28 months. The horizontal extent of areas with high PCE concentrations (> 50 - 100 mg PCE/m³) has been significantly reduced, and this indicates a clear effect of the operation. Areas with low initial discharge concentrations show only small absolute reductions in the concentrations. In a few filters there is, however, increasing concentrations towards the end of the measurement period. This is due to a rising groundwater level and thereby a reduced thickness of the unsaturated zone, and as a consequence of this, a less or total lack of airflow.

Over the two years of operation at the 4 localities, the total removal of PCE is 2-3, 5, 8, and 50-60 kg, respectively. The highest rate of removal is seen in Askov. To this shall be added a small amount of degradation products from PCE, corresponding to approx. 1-5% of the amount of PCE removed. After 2-4 years of operation, the removal rate/year for the systems is estimated at $0.1 - 1$ kg PCE/year, and calculated from the existing data, this roughly corresponds to the estimated seepage to the unsaturated zone. Thus, it can be concluded that the existing systems in the long term will be able to retain the present reduced level of concentration, and potentially further reduce the

concentrations, and hereby reduce the mass flux to the ground water considerably.

At the locality in Askov, it is estimated that the mass flux to the ground water has been reduced during the 2 years of operation in that the concentration of PCE in the ground water directly below one of the passive ventilating wells has decreased from 300 µg/l till 20 µg/l. This is assessed to be in good coherence with the fact that more than 50 kg PCE has been removed from the unsaturated zone. A similar tendency in the ground water has been observed at another project locality.

At the locality in Fakse, measurements have been made in the limestone, through two wells. The average airflow measured is of the same size and with the same discharge pattern as the filters in the sand layer at the site. One of the wells has been installed with a mini 12V vacuum pump, driven by a system of solar cells and a small windmill on the ground. The average flow/year has been approx. 1 m³/h, and from this well and an additional well, a total amount of approx. 0.25 kg PCE have been removed. This pump has yielded 5 times the amount discharged by passive flow, and shows that it is possible in a simple way to increase the natural flow by means of electrical energy from other types of renewable energy sources. The system has been very stabile, but the price (DKK 65,000) for the system is, however, relatively high compared to the effect achieved. The relative contribution of the solar cells is 80% of the total effect, and thus it is assessed that potential future systems should be driven by solar cells directly connected to the pump in order to avoid unnecessary electronic installations, and at the same time obtain considerable savings.

An expected “radius of influence”, corresponding to a well distance of 15 m, was applied in the design at all the project localities. The actual distance applied between the individual wells was, however, from 7 – 20 m, the largest distance in Askov and the smallest in Fakse. In all localities, the concentrations are found to be decreasing over time, but there are no simple coherence between the well distances or the pore volume turnover rate and the effect achieved. If the “radius of influence” is calculated as the horizontal distance, from which a PV well pulls in a volume of soil gas corresponding to an average discharge event, the “radius of influence” can be estimated at 1 m (Fakse) to 4 m (Askov). Using the same method, it has been calculated that one PV well – during the longest discharge event (by volume) – has pulled in air from between 3 m (Fakse) to 10 m (Askov). Generally, the tracer tests indicate a larger transport distance than the calculations above, which is probably due to a certain heterogeneity in the vertical permeability of the unsaturated zone.

By design of future systems, a preliminary phase using active ventilation should be carried out in case the start concentrations are higher than approx. 50-100 mg PCE/m³. Hereby the potentially mass accumulated in the unsaturated zone is considerably reduced. Then, when the removal rate has stabilised, normally after a few weeks or months, the active ventilation is changed to passive ventilation. For sites with a relatively high natural airflow (>2 m³/h), a well distance of 15 m is recommended, but in case of a natural airflow between 0.5 and 2 m³/h, a well distance of 10 m will be adequate. In case the natural airflow is extremely low, a well distance of down to 5 m will be acceptable (<0.5 m³/h). Generally, it is recommended to place the PV wells

in the source area of the overlying low-permeable material, in order to capture the PCE close to where it is transported into the unsaturated zone.

The total construction cost for a standard system with 5-6 PV wells, similar to the system implemented in the localities in Allerød, is approx. 200,000 DKK per site, excl. V.A.T. Dependent on the exact configuration, a PV well to 20 m below surface, incl. GAC-unit, will amount to approx. 35-40,000 DKK, excl. V.A.T. In case there are existing wells, which can be converted into PV, the expenses will be limited to a well, including GAC-unit, which is estimated at approx. 15-20,000, excl. V.A.T. For the system in Askov with discharge through the roof, no GAC-units and incl. 6 wells, the total costs were 190,000 DKK, excl. V.A.T., and thus not much different in price from the system designed with GAC-units. For the PV system (excl. The active system driven by solar cells, etc.), implemented in Fakse, with 8 filters in the sand layer and 2 in the limestone, the total costs were 260,000 DKK, excl. V.A.T. A pilot test including PV can be carried out for the amount of 45-90,000 DKK, excl. V.A.T., dependent on the level of detail, and whether there is an existing suitable well on the site. The design of a standard PV system can be carried out for an amount of 20-40,000 DKK, excl. V.A.T.

The operation costs for the standard system including GAC-units are relatively low, as it will be sufficient with only one inspection a year. In connection with this inspection, measurements of the present concentrations in each filter can be made, and GAC-units with break through can be replaced. This yearly visit, incl. change of 6 GAC-units, and a short report can be carried out for an amount of approx. 45,000 DKK, excl. V.A.T., dependent on the amount of GAC-units to be changed. If the concentration measurements are excluded, the operation costs can be reduced to approx. 20-35,000 DKK/year, excl. V.A.T.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Denne rapport indgår som en del af Miljøstyrelsens teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforureninger. Dette projekt er relateret til en oprensning, hvor der er foreslået Passiv Ventilation (PV), der er en variation af den traditionelle aktive jordventilation (AV), hvor der anvendes en mekanisk pumpe til at drive en luftstrøm ud af jorden. Passiv ventilation er en teknik, hvorved den forurenede poreluft alene ved naturligt forekommende trykgradienter søger til terræn og herved fjernes fra den umættede zone.

1.2 Formålet med teknologiudviklingsprojektet

Det overordnede formål med teknologiudviklingsprojektet er at tilvejebringe et videngrundlag om anvendelse af PV, herunder at:

- Sammenfatte og beskrive eksisterende teori, erfaringer, data og udviklingstendenser fra specielt USA.
- Tilvejebringe dokumentation for effekten af passiv ventilation som oprensningsmetode under de konkrete geologiske og geokemiske forhold – herunder metodens begrænsninger.
- Udvælge nøgleparametre for dimensionering og monitorering.
- Udarbejde retningslinier for etablering, drift, monitorering og afslutning
- Tilvejebringe skøn over omkostninger ved brug af metoden.

1.3 Rapportens opbygning

Baggrund

I rapportens kapitel 2 beskrives den grundlæggende virkemåde for passiv ventilation, herunder betydningen af atmosfæretrykrets variationer. Endvidere gennemgås de udenlandske erfaringer og udviklingstendenser fra specielt USA. Endelig skitseres den principielle opbygning af anlægskomponenterne til en installation for passiv ventilation, og forskellige muligheder for optimering diskuteres.

Detailprojektering

I rapportens kapitel 3 beskrives indledningsvist hovedresultaterne fra de gennemførte pilotforsøg udført på de 4 forsøgs lokaliteter, og herefter de gennemførte aktiviteter omkring prototype-design og krav til de centrale anlægskomponenter til passiv ventilation. Endelig er valg af boringstæthed for de enkelte lokaliteter diskuteret.

Feltlokaliteter

I rapportens kapitel 4 beskrives de overordnede geologiske, hydrogeologiske og forureningsmæssige forhold for hver af de 4 feltlokaliteter. Endvidere

beskrives det generelle datalogger-system til kontinuert opsamling af måledata, herunder de lokalitetsspecifikke variationer.

Resultater

I rapportens kapitel 5 præsenteres resultaterne af de gennemførte flow- og koncentrationsmålinger af den udstrømmende poreluft, samt evt. tracerforsøg og andre delforsøg for hver af de 4 feltlokaliteter.

Diskussion

I rapportens kapitel 6 diskuteres de opnåede resultater i forhold til de anvendte design, og i relation til design og drift af fremtidige anlæg.

Økonomi

I rapportens kapitel 7 skitseres omkostningerne for etablering og drift af de forskellige varianter af systemerne til passiv ventilation. Priserne er baseret på erfaringerne fra de 4 projektilokaliteter.

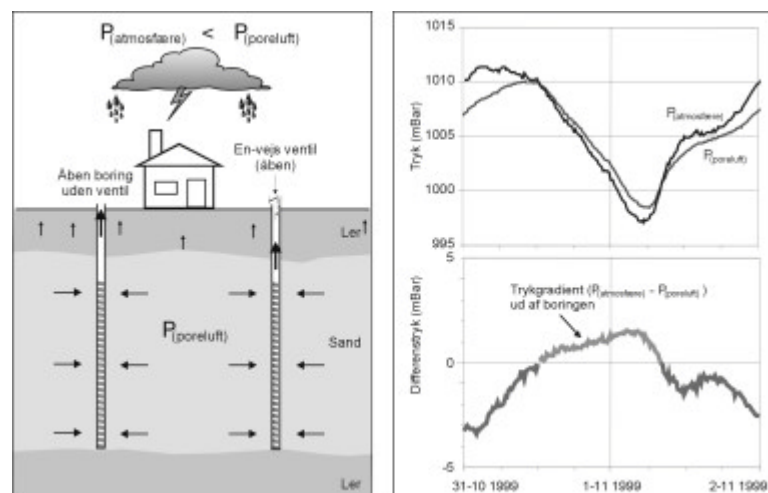
2 Virkemåde og teoretisk grundlag

2.1 Generel beskrivelse af virkemåde for passiv ventilation

Ved passiv vakuumventilation (PV) udnyttes de naturligt forekommende trykgradier mellem atmosfæren og den umættede zone til at drive poreluften til terræn. En eventuel flygtig forureningskomponent i den umættede zone, som fx PCE, vil blive transporteret med luftstrømmen til atmosfæren, jf. figur 2.1. PV-systemet beskrevet i denne rapport fokuserer alene på at udnytte og optimere massefjernelsen via lodrette borer, mens transporten gennem grænsefladen mellem atmosfæren og jorden ikke er medtaget – herunder betydningen af de naturligt forekommende sprækker i moræneler.

Naturlige vertikale trykgradier

Disse trykgradier er resultatet af en dæmpning og forsinkelse af trykforplantningen mellem atmosfæren og den umættede zone. Størrelsen af denne trykforskel afhænger bl.a. af den overliggende jords tykkelse og effektive permeabilitet samt den hastighed, hvormed atmosfæretrykket ændrer sig. På grund af denne dæmpning og forsinkelse vil der stort set altid være en trykgradient af varierende størrelse.



Figur 2.1

Princip ved passiv ventilation (PV) under faldende barometerstand (Lavtryk). Differenstrykket er forskellen mellem det absolutte tryk i atmosfæren og i den umættede zone under dæklaget.

Under faldende atmosfæretryk er trykforholdene i jorden for en situation med et lavpermeabelt dæklag illustreret på figur 2.1. Et stykke tid efter at atmosfæretrykket er begyndt at aftage, vil der være ens tryk i atmosfæren og den umættede zone, og differenstrykket vil være nul. I takt med at atmosfæretrykket falder yderligere, vil der opbygges et differenstryk over dæklaget, idet trykforplantningen og dermed trykudligningen gennem dæklaget sker langsommere end den rate, hvormed atmosfæretrykket falder. Som det fremgår af figur 2.1, vil det absolutte tryk i den umættede zone således blive større end atmosfæretrykket. Differenstrykket fortsætter med at

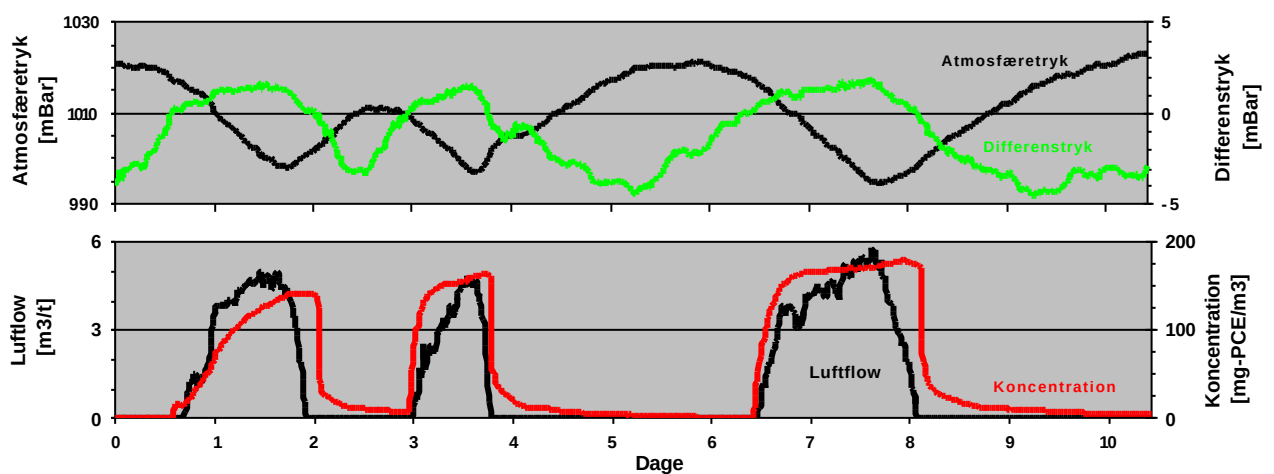
vokse, indtil enten raten, hvormed atmosfæretrykket ændrer sig, begynder at aftage, eller differenstrykket har nået en størrelse, der balancerer den løbende trykudligning gennem dæklaget. Efter at atmosfæretrykket er begyndt at stige, vil der fortsat gå et stykke tid, inden differenstrykket er udlignet, og der således er samme tryk i atmosfæren og i den umættede zone.

For at udligne differenstrykket over dæklaget vil poreluften søge fra den umættede zone og gennem jordens porer til terræn. I de tilfælde, hvor de terrænnære jordlag er lavpermeable, yder de en meget stor modstand for luftens vertikale bevægelse, og den vertikale lufthastighed bliver derfor meget lav, og trykket udlignes kun langsomt. Ved tilstedeværelse af præferentielle strømningsveje med lav strømningsmodstand vil poreluften søge igennem disse. Figur 2.1 viser, hvordan den forurenede poreluft transporteres via et lodret filterrør (filtersat boring), der virker som en præferentiel strømningsvej. Udover menneskeskabte præferentielle strømningsveje, må udbredelsen af naturlige vertikale sprækker, forårsaget af bl.a. tektoniske påvirkninger og rodhuller, forventes at have en betydning for transporten af poreluft ud af den umættede zone.

Omvendt medfører stigende atmosfæretryk, at der efter et stykke tid vil blive opbygget et svagt overtryk i atmosfæren i forhold til den umættede zone, hvorved atmosfærisk luft vil blive presset ned i jorden for at udligne denne trykforskel. Er der igen præferentielle strømningsveje i form af en filtersat boring, vil atmosfærisk luft blive "suget" ned i boringen og ud i den umættede zone, jf. figur 2.1. For at undgå denne indstrømning af atmosfærisk luft, kan der monteres en simpel en-vejs-ventil, der kun tillader luften at strømme ud af boringen. Herved undgås en fortynding og spredning af forureningskomponenter i gasfasen i den umættede zone.

Flow af poreluft fra den umættede zone

Den øjeblikkelige størrelse af luftflowet ud af den umættede zone afhænger af en række faktorer, og vil generelt være bestemt af størrelsen af det aktuelle differenstryk og luftpermeabiliteten i den umættede zone. På figur 2.2 er der for en af de aktuelle feltlokaliteter vist en typisk variation for de centrale parametre: Atmosfæretryk, differenstryk og luftflow.



Figur 2.2
Variation i fundamentale parametre for passiv ventilation (PV) for en periode med både stigende og aftagende atmosfæretryk.

For den viste periode på ca. 10 dage ses det tydeligt, at luftudstrømningen indenfor en enkelt udstrømningsperiode når et maksimum svarende til det tidspunkt, hvor differenstrykket er maksimalt, og at den har en varighed meget tæt på den periode, hvor differenstrykket er positivt. Effekten af en-vejsventilen er også meget tydelig, idet den effektivt forhindrer luft i at strømme ned i filtret i perioder med negativt differenstryk. Koncentrationen af PCE i den udstrømmende poreluft viser en relativt hurtig stigning umiddelbart efter at poreluften er begyndt at strømme ud af filtret. Koncentrationen når et relativt stabilt niveau ved den sidste af de 3 udstrømningsperioder vist på figur 2.2.

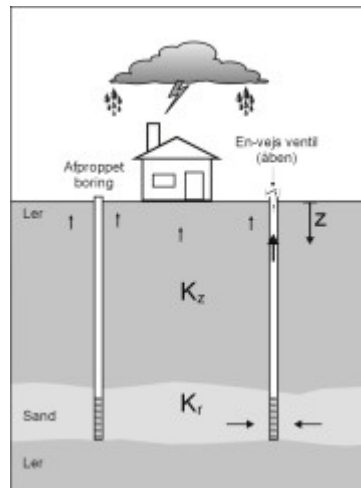
Styrende processer bag variationen i atmosfæretrykket

Atmosfæretrykket udtrykker vægten pr. arealenhed af den luftsøjle, som findes mellem jordoverfladen og stratosfæren i 160 km's højde. Dette tryk genereres primært af tyngdekraftens påvirkning af luftsøjlen. Hvis massen i denne luftsøjle var konstant, ville trykket også være konstant - hvilket ikke observeres i praksis. Således spiller en række faktorer som terrænforhold, vandindhold, kemiske forhold i atmosfæren, luftbevægelser og andre dynamiske processer en væsentlig rolle. Disse faktorer er primært styret af energiindstrålingen fra solen. Den tilnærmelsesvis cykliske variation i energi-inputtet til luftsøjlen fra dels solindstrålingen og dels afgivelse af varme fra jordoverfladen resulterer i en kontinuert variation af det atmosfæriske tryk. Den absolutte variation i trykket er relativt lille, og udgør kun få procent af det totale tryk. Men på grund af det enorme luftvolumen, som disse ændringer påvirker, er energien indeholdt heri næsten ubegrænset.

2.2 Teoretisk beskrivelse af tryk- og flow ved passiv ventilation

De observerede variationer af differenstryk og luftflow fra passivt ventilerende borer kan beskrives ved en relativt simpel matematisk model. Dette har stor betydning ved fortolkning af pilotforsøg, og i andre sammenhænge, hvor der ønskes et estimat for permeabiliteten af de forskellige jordlag. Der henvises i øvrigt til afsnit 2.4, hvor den historiske udvikling inden for både modellering og observation af atmosfæretrykkets forplantning igennem jordlagene er nærmere beskrevet.

Den simple situation med et enkelt lavpermeabelt dæklag, og en umættet zone herunder, er skitseret på figur 2.3. Denne situation er generelt gældende for alle 4 feltlokaliteter, med undtagelse af kalken i Fakse, der er overlejret af to lerlag og et umættet sandlag.



Figur 2.3

Generel geologisk model og primære modelparametre til beskrivelse af tryk- og flow ud af passivt ventilerende borer på feltlokaliteterne.

Beskrivelsen af trykforplantningen gennem det lavpermeable dæklag kan sammenlignes med varmetransport gennem et porøst medie. Med henvisning til figur 2.3, kan den en-dimensionale vertikale trykforplantning matematisk beskrives ved følgende differentialligning :

$$\frac{j S_g m}{k_z P_{avg}} \frac{\partial}{\partial t} P(z, t) = \frac{\partial^2}{\partial z^2} P(z, t)$$

I udtrykket indgår, udover de centrale parametre i figur 2.3, følgende størrelser:

z :	Dybde (meter)
$P(z,t)$:	Trykket i en given dybde som funktion af tiden (Pascal)
$P_{atm}(t)$:	Atmosfæretrykket som funktion af tiden (Pascal)
h :	Dybden til nedre randbetingelse, fx grundvandsspejlet (meter)
P_{avg} :	Gennemsnitligt atmosfæretryk (Pascal)
k_z :	Vertikal permeabilitet (m^2)
j :	Porøsitet (-)
m :	Viskositet af gassen ($kg/m \text{ sek}$)
S_g :	Mætningsgrad af jorden (-)

Randbetingelserne for problemet i figur 2.3 er:

$$\begin{aligned} z = 0, \quad P(0,t) &= P_{atm}(t) && \text{(ved terræn)} \\ z = h, \quad \frac{\partial P(h,t)}{\partial z} &= 0 && \text{(ved nedre rand)} \end{aligned}$$

Differentialligningen kan løses numerisk på forskellige måder, og der henvises til /ref. 17/, hvor dette er gennemgået i detaljer. Sammen med denne reference er der publiceret simple programmer, der med udgangspunkt i ovenstående parametre og en tidsserie for atmosfæretrykket, kan beregne en tidsserie for differenstrykket. Det er således ved hjælp af dette program (Barosolve.exe) muligt at estimere den værdi for k_z , der giver den bedste overensstemmelse mellem det observerede og beregnede differenstryk.

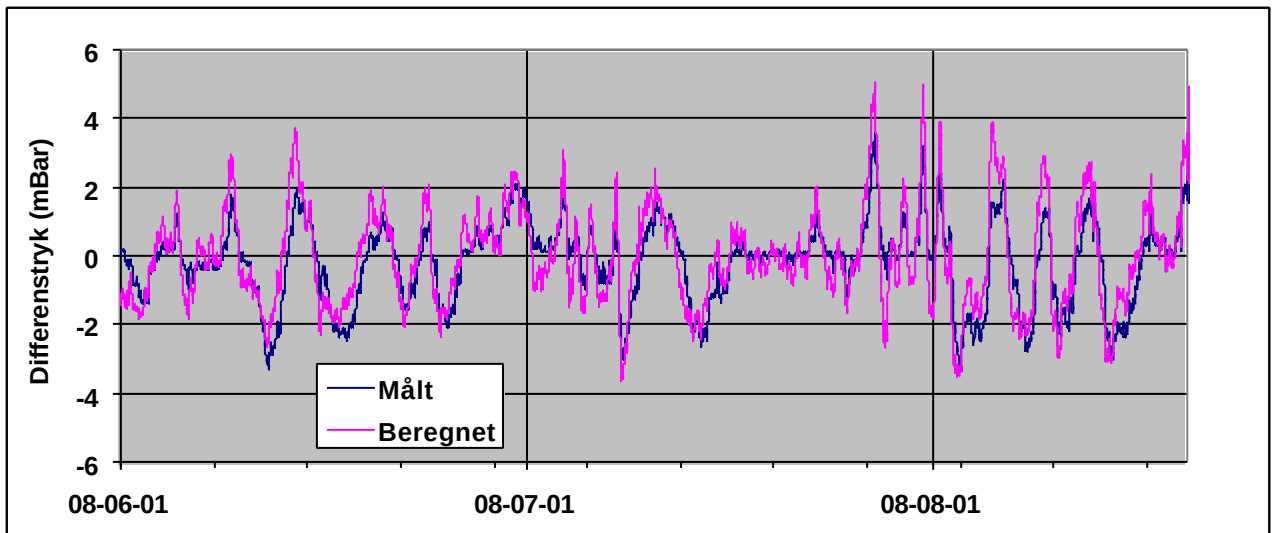
På tilsvarende måde kan der opstilles en differentiaalligning, som beskriver udstrømningen af poreluft fra en boring som funktion af atmosfæretrykket. Udstrømningen af luft fra boringen kan principielt sammenlignes med den horisontale vandtilstrømning til en boring i et spændt magasin uden lækage ved en momentan trykafsænkning. Ved en række passende antagelser, hvortil der igen henvises til /ref. 17/, kan denne differentiaalligning løses numerisk. Ved hjælp af et public domain program (Baroflow.exe), kan der med input i form af en tidsserie for atmosfæretrykket, den beregnede værdi for k_z samt et estimat for den horisontale permeabilitet i den umættede zone k_h , beregnes en tidsserie for udstrømningen af poreluft fra boringen. Ved at variere k_h er det således muligt at estimere den værdi for k_h , der giver den bedste overensstemmelse mellem det observerede og beregnede luftflow ud af boringen.

Da det ikke er muligt at måle både luftflow og differenstryk i samme boring i forbindelse med et pilotforsøg, kan det være nødvendigt at opdele testen i to separate perioder af fx 14 dages varighed. I den første periode måles differenstrykket mellem den umættede zone og atmosfæren fx hver 15. min. ved hjælp af en datalogger tilkoblet en differenstryk-transmitter. Boringen skal under målingerne være forseglet mod atmosfæren. I den næste periode måles størrelsen af den udstrømmende luftmængde fx hvert 15. min. ved hjælp af en flow-transmitter tilkoblet en datalogger. Boringen skal under målingerne være åben mod atmosfæren og have monteret en en-vejs-ventil. I stedet for at opdele pilotforsøget i to dele, kan luftflowet måles i én boring samtidig med at differenstrykket måles i en anden nærliggende boring, som vurderes at ligge udenfor det område, som påvirkes af den boring, der er åben mod atmosfæren.

2.3 Eksempler på estimation af parametre ud fra tidsserier

Til illustration af procedure ved fortolkning af data fra enten en egentlig pilot-test eller driftsdata fra et igangværende system, tages der udgangspunkt i de to lokaliteter i Allerød. De anvendte data er registreret i forbindelse med selve driften af anlæggene. Ved fortolkningen af data er det nødvendigt først at beskrive geometrien i systemet, dvs. tykkelsen af dæklaget, tykkelsen af den umættede zone og dybden til den nedre randbetingelse. Herudover er det nødvendigt at specificere enten målte eller skønnede værdier for de enkelte lags porøsitet og vandmætning. Med udgangspunkt i lokaliteten på Prins Valdemars Alle i Allerød er der udtaget en ca. 2,5 mdr. lang målt tidsserie for hhv. atmosfæretryk og differenstryk i et referencefilter på lokaliteten. Værdien af de faste parametre som porøsitet, dæklagstykkelse osv. fremgår af den hydrogeologiske beskrivelse i afsnit 4.3.1, hvortil der henvises.

Værdien af den vertikale permeabilitet k_z er varieret, indtil der er opnået en tilfredsstillende overensstemmelse mellem det målte og det beregnede differenstryk. På figur 2.4 er vist tidsserier for det målte og beregnede differenstryk, idet der er anvendt en værdi for dæklagets permeabilitet på $k_z=0.2$ Darcy. Beregningsmodellen er relativt følsom overfor værdien af k_z , og giver således et relativt præcist estimat for k_z .

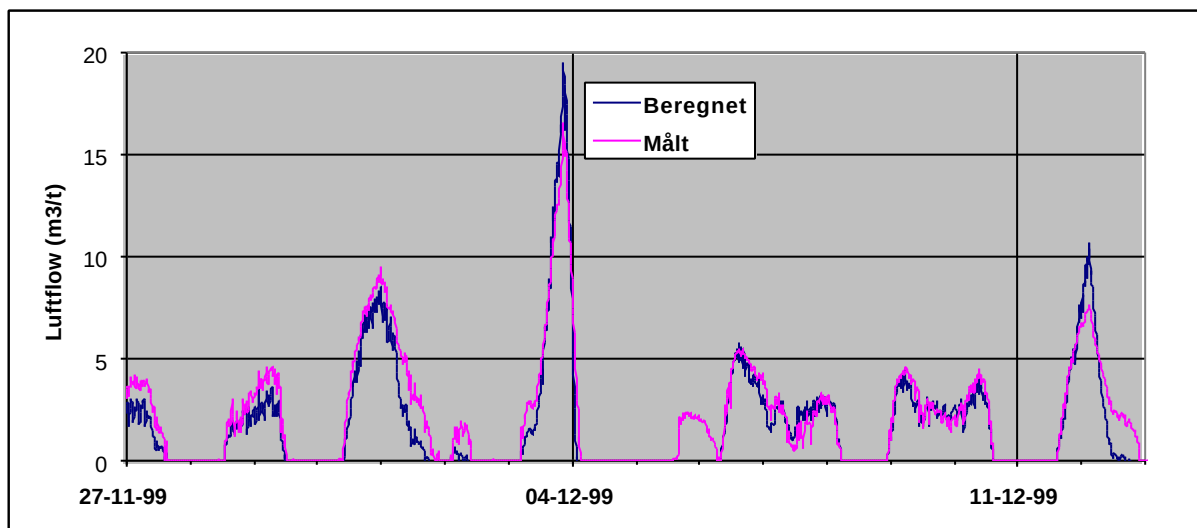


Figur 2.4

Estimation af dæklagets permeabilitet (k_z) ved hjælp af målte tidsserier for atmosfære- og differenstryk.

Der ses en generel tendens til overestimation af de positive differenstryk, hvilket sandsynligvis skyldes, at referencefiltret er påvirket af en horisontal trykudligning fra de omkringliggende passivt ventilerende borer. Det er dog generelt muligt at forudsige differenstrykket med tilstrækkelig præcision til, at det ikke påvirker de efterfølgende beregninger af den horisontale permeabilitet væsentligt. Eventuelle "huller" i måleserierne for differenstryk, forårsaget af fejl på måleudstyret, kan således udfyldes med beregnede data, uden at der herved introduceres væsentlige fejl. Dette er udnyttet på begge lokaliteterne i Allerød, hvor der i perioder har været fejl på måleudstyret.

Efter at dæklagets permeabilitet k_z er bestemt, kan den horisontale permeabilitet k_h i den umættede zone estimeres ud fra en tidsserie med atmosfæretryk og luftflow ud af boringen, samt den estimerede horisontale permeabilitet k_h . I praksis gøres dette ved at variere k_h , indtil der opnås en tilfredsstillende overensstemmelse mellem det målte og det beregnede luftflow. På figur 2.5 er vist tidsserier for det målte og beregnede luftflow, idet der er anvendt den tidligere bestemte værdi for dæklagets permeabilitet på $k_z=0.2$ Darcy og en horisontal permeabilitet på $k_h=20$ Darcy. Også denne beregningsmodel er relativt følsom overfor værdien af k_h , og giver et relativt præcist estimat for k_h .



Figur 2.5

Estimation af den umættede zones horisontale permeabilitet (k_h) ved hjælp af målte tidsserier for atmosfæretryk og luftflow.

Der kan generelt opnås en rimelig tilfredsstillende overensstemmelse mellem det målte og beregnede flow, og generelt kan det samlede flow over en periode estimeres indenfor en usikkerhed på ca. 5%. Der kan dog i den viste periode ses en enkelt mindre udstrømningsperiode d. 6-12-99, som ikke forudsiges korrekt, hvilket ikke umiddelbart kan forklares. Det bemærkes, at også det meget store flow, som blev observeret d. 3-12-99 i forbindelse med orkanen, der ramte Danmark, bliver forudsagt korrekt. Den dårligere overensstemmelse mellem det målte og beregnede flow i de første par udstrømningsperioder skyldes, at beregningsprogrammet bruger en numerisk medtode med et glidende gennemsnit. Denne metode kræver et par dages data for at initialisere og stabilisere beregningerne.

De beregnede værdier for k_z (0.2 Darcy) og k_h (20 Darcy) indikerer, at der er en faktor ca. 100 i kontrast mellem permeabiliteten i dæklaget og i den umættede zone. De bestemte værdier er i rimelig overensstemmelse med litteraturværdier for hhv. moræneler (k_z) og fint velsorteret smeltevandssand (k_h).

Ved udførelse af pilot-forsøg med passiv ventilation, og hvor der ønskes en bestemmelse af både den vertikale og horisontale permeabilitet, vil det være tilstrækkeligt med en målefrekvens på 30 min. og en samlet observationsperiode på ca. 14 dage for flow og differenstryk.

2.4 Historiske observationer af atmosfæretrykket

I bl.a. de indianske kulturer er det igennem århundreder blevet observeret, hvordan åbne huler blæste luft ind og ud. Disse observationer er senere beskrevet af speleologer (den videnskabelige lære om huler), og disse cykler kaldet 'cave breathing', skete efter et fast mønster, normalt med udstrømning om morgenen og indstrømning om aftenen. De tidligste observationer af atmosfæretrykkets indflydelse på den naturlige luftstrømning ind og ud af borer blev rapporteret af Fairbanks i 1896 /ref. 5/. Det blev her observeret,

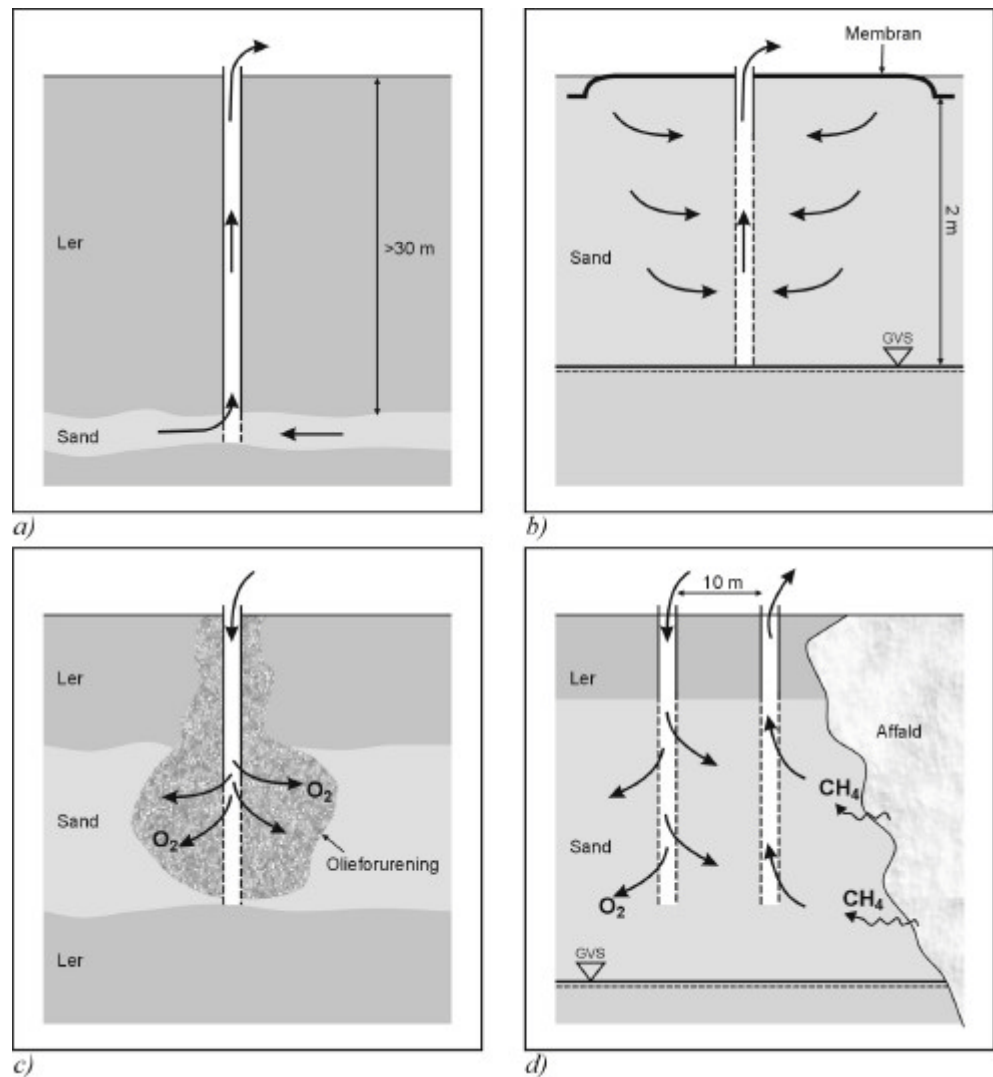
at en boring ”åndede” luft ind hhv. ud i takt med stigende hhv. faldende atmosfæretryk. Det blev også observeret, at den strømmende luftmængde var relativt større i perioder med meget skiftende vejr. Allerede i 1904 formulerede Buckingham en korrekt teori for, hvordan ilten i atmosfærisk luft blev transporteret ned i jordsøjlen som følge af variationer i atmosfæretrykket /ref. 6/. Denne teori beskrev også matematisk, hvordan trykket i atmosfæren forplanter sig ned i jorden, og i forbindelse hermed dæmpes og forsinkes, afhængigt af dybde og jordegenskaber.

De fleste referencer af gastransport forårsaget af variationer i atmosfæretrykket findes i forbindelse med radon /ref. 7/, lossepladsgastransport /ref. 8/ og transport af radioaktive gasser efter nukleare forsøgssprængninger /ref. 9/. I enkelte tilfælde er den naturlige variation i poreluftkoncentrationen og fluxen af flygtige stoffer ud af jorden vurderet /10,11/. Typisk for disse problemstillinger sker transporten i de relativt terrænnære jordlag. Også de hydrostatiske forhold i grundvandsmagasiner påvirkes af ændringer i atmosfæretrykket – populært kaldet barometereffekten, og dette fænomen er meget indgående analyseret /ref. 12/.

2.5 Udnyttelse af variationer i atmosfæretryk til oprensningsformål i USA

I litteraturen er der rapporteret relativt få anvendelser af det varierende atmosfæretryk i forbindelse med oprensningsformål. De referencer, der findes, er stort set alle knyttet til et større DOE (Department Of Energi) finansieret udviklingsprojekt, som blev gennemført i USA i perioden 1990-1996. I dette projekt dokumenterede forskere fra Hanford /ref. 13/, Savanna River /ref. 14./ og INEL /ref. 15/ både de teoretiske muligheder for at udnytte de naturligt forekommende luftstrømninger, og der blev gennemført pilotforsøg på en række vertikale borer under varierende geologiske forhold. Forsøgene blev alle udført i områder, hvor der tidligere var konstateret forurening med bl.a. chlorerede opløsningsmidler.

På Hanford blev der specielt arbejdet med design og prøvning af luftfiltrering af afkastluften, idet der udover bl.a. carbontetraklorid også kunne måles et indhold af radioaktive gasser. Samtidig blev der afprøvet en mekanisk en-vejs-ventil styret af en tryktransducer, men dette system fungerede ikke optimalt. På Savannah River blev der udviklet og kommercialiseret en simpel en-vejs-ventil, ”BaroBall”, til styring af luftstrømningen ind og ud af boringen. Der blev også foretaget en lang række numeriske undersøgelser vha. flerfase-modellen T2VOC, og det blev konkluderet, at brugen af en-vejs-ventiler over tid gav en forøget massefjernelse i forhold til en åben boring /ref. 16/. På baggrund af dette arbejde blev der i 2001 publiceret nogle simple beregningsmodeller til vurdering af resultater af pilotforsøg med passiv ventilation /ref. 17/. Resultaterne fra Savannah River viser, at det er muligt at reducere både udbredelsen af både PCE og TCE i poreluften og koncentration sniveauerne generelt. Der kunne observeres eksponentielt aftagende koncentrationer, og stopkriteriet på 1 ppm skønnedes at kunne nås indenfor en 10-års driftperiode. Den principielle anvendelse af teknikken i disse sager fremgår af figur 2.6-a, og udnytter et relativt mægtigt lavpermeabelt dæklag.



Figur 2.6

Forskellige anvendelse af passivt ventilerende boringer til afværgeformål.

- a) Ventilering af chlorerede opløsningsmidler eller andre flygtige komponenter, b) BERT, c) Bioventing af oliekomponenter d) Afskæring af lossepladsgas.

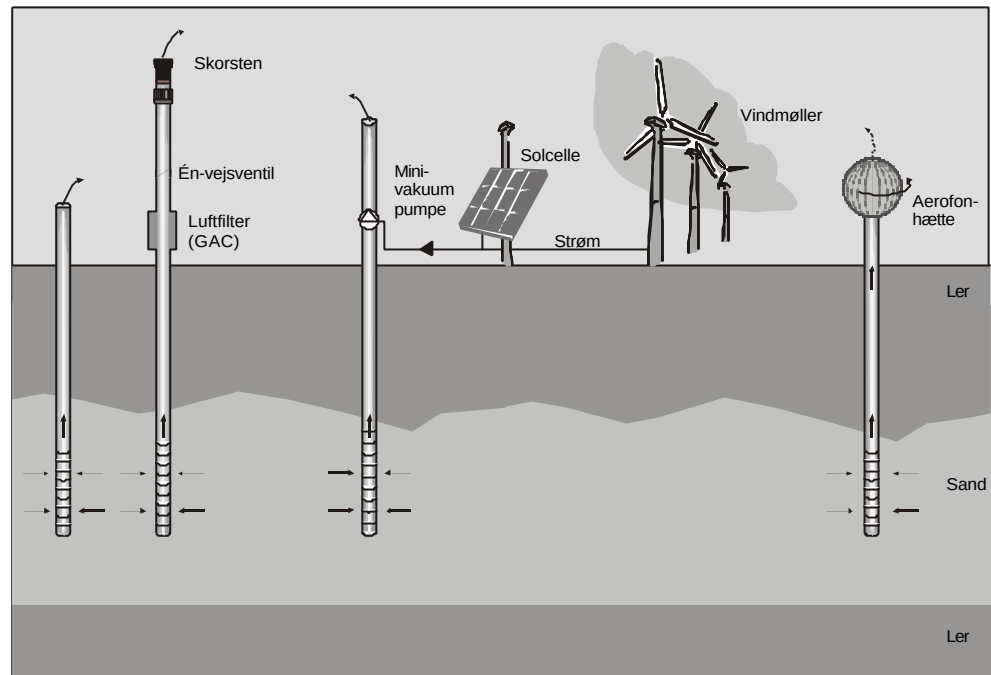
Under et andet DOE projekt, har forskere fra bl.a. Los Alamos undersøgt muligheden for passivt at ventilere terrænnære forurenede jordlag ved hjælp af en teknik benævnt BERT (Barometric Enhanced Remediation Technology) /ref. 18/. Disse områder kunne være tidligere bassiner, hvortil forurenede proces- og afløbsvand har været tilledt med henblik på nedsivning. Da der i denne situation ikke er noget naturligt lavpermeabelt dæklag, er der udlagt en kunstig lufttæt membran med dimensionerne 30 m x 30 m. Denne membran tvinger ændringer i lufttrykket til at forplante sig udenom – og ind under membranen, hvorved der periodisk opstår en horisontal trykgradient i de forurenede jordlag under membranen. Centralt under denne membran er der placeret en vertikal filtersat boring. I perioder med en gradient ind mod boringen i centret vil der strømme forurenede poreluft ud af boringen, mens envejs-ventilen i perioder med en udadrettet gradient vil blokere for indstrømmende atmosfærisk luft. Princippet er illustreret på figur 2.6-b. Resultaterne viser, at der kunne opnås et gennemsnitligt luftflow på ca. 9 m³/dag og en fjernelsesrate på ca. 0,6 kg/år. Ved at montere en mini-vindturbine på toppen af boringen kunne luftflowet øges til ca. 30 m³/dag.

En anden udnyttelse af de naturlige luftflow fra boringer er passiv bioventing, jf. figur 2.6-c. I denne situation udnyttes perioderne med indstrømning af atmosfærisk luft til at tilføre ilt til den umættede zone. Herved kan den biologiske aerobe omsætning af oliekomponenter stimuleres, og forureningen kan nedbrydes in-situ. Ved forsøg i Californien /ref. 19/ er der påvist et naturligt luftflow på op til 30 m³/t og en stigning i iltindholdet i den umættede zone i en afstand på op til ca. 15 m fra boringen under perioder med indstrømning af atmosfærisk luft. Influensradius for metoden på lokaliteten blev vurderet til ca. 12 m, indenfor hvilken det over tid var muligt at opretholde et minimums-iltindhold på ca. 5% vol./vol.

Til afskæring af den horisontale gastransport fra en losseplads og ind under et beboelsesområde er der afprøvet et system bestående af passive injektions- og ekstraktionsboringer /ref. 20/. Med en indbyrdes afstand på ca. 10 m var der placeret en række med 18 ekstraktionsboringer nærmest lossepladsen, mens der parallelt med og ca. 20 m herfra var placeret en række med i alt 18 injektionsboringer, jf. figur 2.6-d. Monitoringsresultaterne viste, at der kunne opnås passiv luftflow på op til 1-2 m³/t fra de enkelte boringer, og at der kunne fjernes en væsentlig mængde lossepladsgas passivt. Kombinationen af injektions- og ekstraktionsboringer reducerede koncentrationen af methan i den passivt udstrømmende luft fra ca. 50% vol. til ca. 20% vol. Der kunne observeres en svag effekt på methan-koncentrationen i en række poreluftsonder placeret ca. 15 m fra de to rækker boringer, idet methankoncentrationerne her aftog med ca. 1-20%.

2.6 Opbygnings- og anlægskomponenter for system til passiv ventilation

Et system til passiv ventilation (PV) består som minimum af en boring, som er filtersat i den umættede zone og åben mod atmosfæren for at lede poreluften ud. Denne basale konfiguration og en række mere avancerede kombinationer af komponenter, der er beskrevet i det følgende, er skitseret på figur 2.7.



sag\99394.00\notat passiv ventilation\figur2_1.cdr

Figur 2.7
Forskellige anlægsopbygninger til passiv ventilation

Optimering ved hjælp af en-vejs-ventil

En-vejs-ventiler bruges for at begrænse strømning af atmosfærisk luft ned i den umættede zone. Uden en sådan ventil vil der i perioder, hvor atmosfæretrykket er større end trykket i den umættede zone, opstå en luftstrøm af atmosfærisk luft tilbage i jorden via boringen. Selvom dette i sig selv ikke forhindrer systemet i fortsat at fjerne forurening, så betyder indblæsningen af den atmosfæriske luft, at forurenede poreluft bliver presset væk fra selve boringen, hvilket vil medføre en vis fortynding af den udstrømmende poreluft, når luftstrømmen i en efterfølgende periode er udadrettet som følge af ændrede trykforhold i atmosfæren.

Standard prototype

Det standard prototype-design, som afprøves på 3 af de 4 lokaliteter i dette projekt, består, udover selve boringen, af et aktivt kulfilter (GAC), en en-vejs-ventil samt diverse rørføringer for afkast af luften til atmosfæren. GAC-systemet bruges til rensning af poreluften, før den udledes til atmosfæren. Systemet fungerer samtidigt som et passivt VOC-opsamlingsystem i stil med traditionelle kulrør. Dette giver således mulighed for at analysere GAC-granulatet, hvorved massefluxen fra boringen kan beregnes.

Simpel variant

På den ene af de 4 lokaliteter er afprøvet den simpleste variant med direkte urensset afkast til atmosfæren. Før et sådant PV-system kan realiseres, skal der foretages en OML-beregning (Operationel Meteorologisk Luftkvalitetsmodel) med henblik på at kunne dokumentere, at Miljøstyrelsens Luftvejledning nr. 2, 2001 /ref.1/, overholdes. OML-beregningen tager udgangspunkt i en bestemmelse af den nødvendige skorstenshøjde for overholdelse af B-værdier for forurenings-komponenter 1,5 meter over terræn i skel mod nabo. Med hensyn til udregning af nødvendig skorstenshøjde henvises til /ref.1/. En række B-værdier for de relevante stoffer er listet i bilag 1-7. I praksis vil det på

grunde med beboelse være nødvendigt at overholde B-værdierne på selve grunden.

Andre metoder til optimering

For at maksimere flowet af poreluft ved at forøge vakuumet direkte i boringen, kan også andre teknikker baseret på vedvarende energi bruges. Rent mekaniske systemer omfatter bl.a. venturi-hætter og vindturbiner (Aerofon hætter), som udnytter vindenergien direkte. Disse systemer kan dog ikke generere vakuum af betydning, dvs. større end ca. 0.1 mBar. Andre systemer omfatter små ventilatorer eller pumper, som drives af batterier, der løbende oplades af solceller og/eller mini-vindmøller, jf. figur 2.3.

På en af de 4 lokaliteter er der implementeret et system, der ved hjælp af vindenergi (vindmølle) og solindstråling (solcelle) driver en mini-vakuum-pumpe i en enkelt af borerne.

3 Design af prototype-system

3.1 Resultater fra indledende pilotforsøg

Pilotforsøg

I forbindelse med de gennemførte pilottests med passiv ventilation på 3 af de 4 forsøgslokaliteter, er der over en måleperiode på 2-4 uger pr. 15 min. registreret sammenhørende værdier af atmosfæretryk, differenstryk, luftflow og koncentration af bl.a. PCE og TCE /ref. 2-4/.

Differenstryk

De gennemførte målinger af differenstryk viste, at der i perioder med aftagende atmosfæretryk kunne registreres maksimale differenstryk mellem den filtersatte del af den umættede zone og atmosfæren på op til ca. 10 mBar, og et gennemsnitligt differenstryk i udstrømningsperioderne på ca. 2-3 mBar.

Luftflow

Tilsvarende kunne der for de registrerede flow af poreluft ud af boringerne beregnes et gennemsnitligt luftflow på mellem 0,25 og 1 m³/t og et maksimalt luftflow (ved maksimalt differenstryk) på 10-15 m³/t.

Målte fjernelsesrater

Koncentrationsmålingerne viste en maksimal totalkoncentration af chlorerede opløsningsmidler (PCE, TCE, TCA og cis-1,2-DCE) på mellem 100 og ca. 500 mg/m³. Baseret på de sammenhørende værdier af luftflow og total koncentration, kunne der estimeres en forventet årlig maksimal fjernelsesrate pr. boring på 0,1-2 kg chlorerede opløsningsmidler.

3.2 Kravspecifikationer til enkeltkomponenter

Baseret på pilotforsøgene, kan de overordnede funktionelle krav til de enkelte komponenter beskrives.

Krav til differenstryk

Den begrænsende faktor for størrelsen af luftflowet ud af en boring til passiv ventilation, er den til rådighed værende trykdifferens. Trykdifferencen er forskellen i tryk mellem det filtersatte niveau i den umættede zone og atmosfæren, og udgør den drivkraft, som skal drive luftstrømmen gennem systemet af rør og GAC-filter. Hvis det tilgængelige differenstryk således ikke er væsentlig større end tryktabet gennem systemet, vil der kun registreres et minimalt luftflow. Da der i gennemsnit kun er få mBar differenstryk til rådighed, er det valgt at dimensionere samtlige komponenter, således at tryktabet er mindst muligt, hvilket i praksis vil sige under 0,1-0,5 mBar.

Kulfilter (GAC)

Da der som udgangspunkt ønskes et system, som ikke udleder forureningskomponenter til atmosfæren, er det nødvendigt at lede poreluften igennem et kulfilter før udledning til atmosfæren. Den nødvendige størrelse af kulfilteret blev indledningsvist skønnet udfra de estimerede årlige maksimale

fjernelsesrater og et ønske om et kulsifte højst en gang om året. Med udgangspunkt i de gennemførte test, og en konservativ forventning om en adsorptionskapacitet på kun 10-20% af kullenes vægt, er der designet og testet en prototype af et aktivt kulfilter (GAC) med en samlet kulmængde på ca. 14 kg.

Indbygning i brønde

For at kunne implementere systemet uden at have egentlige installationer over terræn, blev der stillet krav om, at alle systemkomponenter skulle kunne være i én brønd og at brøndens dimension blev mindst mulig.

Test af komponenter

Baseret på de opstillede krav, er der gennemført laboratorieforsøg til dokumentation af bl.a. en-vejs-ventilers og GAC-systemets faktiske tryktab. Udover selve forsøgene, er der gennemført teoretiske beregninger af de forventede tryktab for en række af komponenterne, og disse er sammenlignet med de faktiske målinger. Samtlige målinger og beregninger er samlet i bilag 1.

3.3 Samlet beskrivelse af prototype-systemet

Med udgangspunkt i de opstillede krav til design og funktion er der skitseret et prototype-system. Dette system er opbygget af følgende hovedkomponenter, jf. figur 3.1:

- Filtersat boring
- Overgangs-/moniteringsstykke
- En-vejs-ventil
- Kulfilter
- Udluftsbrønd med luft- og vandtæt dæksel

Boringen filtersættes i den umættede zone i det niveau, hvorfra der ønskes opsamlet forurenede poreluft.

Filteret monteres med et blindrør, der for enden monteres et overgangs-/monite-ringsstykke. Ovenpå overgangs-/moniteringsstykket monteres evt. et kulfilter for opsamling/rensning af den opstrømmende forurenede luft, alt afhængig af de aktuelle forureningskoncentrationer og immissionskravene på den enkelte lokalitet.

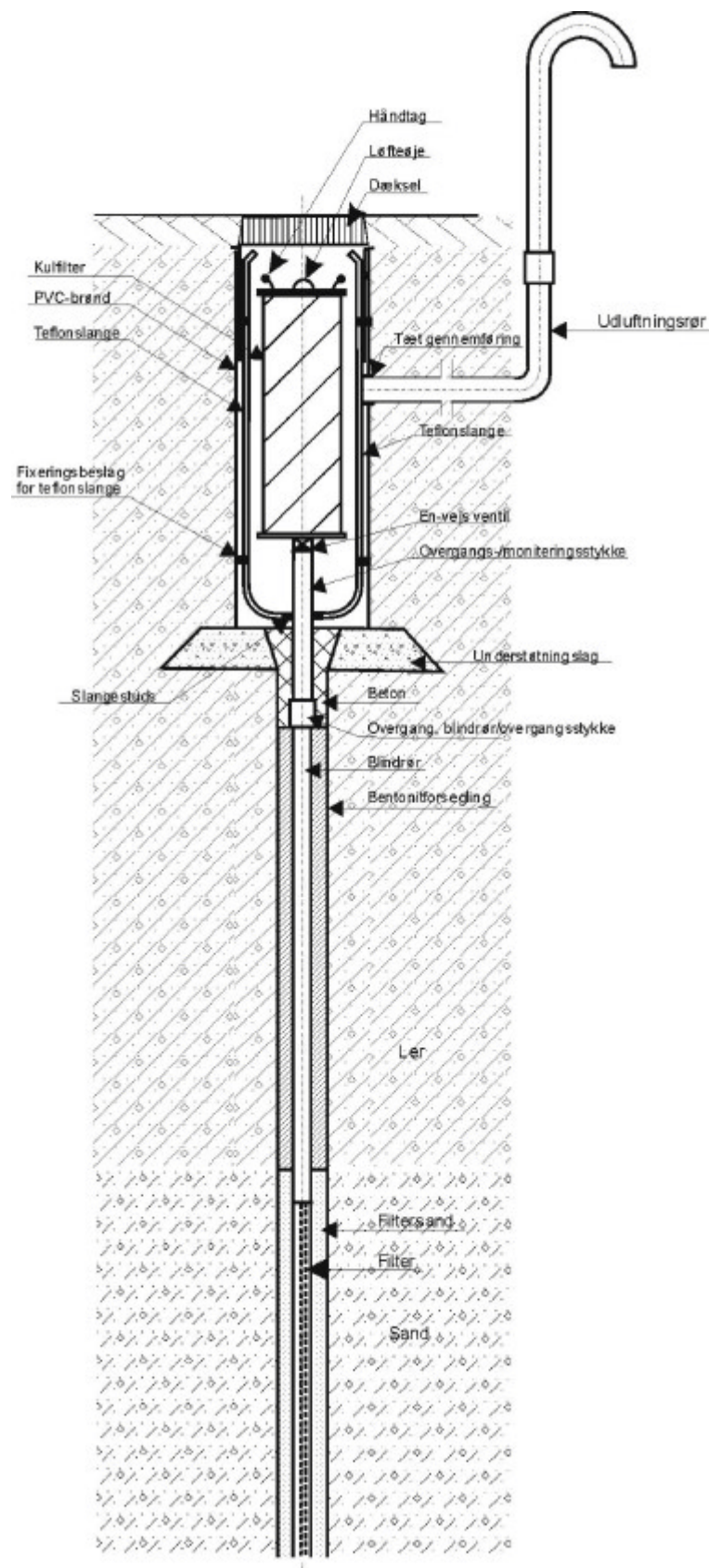
Bunden af kulfilteret monteres med en studs med udvendigt gevind for montering af kulfilter på overgangs-/moniteringsstykket. Indvendigt i studsen installeres en en-vejs-ventil, der hindrer luft i at strømme ned i boringen ved stigende atmosfæretryk med risiko for spredning og fortynding af den allerede konstaterede forurening. En-vejs-ventilen tillader således kun, at der strømmer luft ud af boringen. Efter rensning i kulfilter strømmer luften ud i brønden, hvorfra det via udluftsbrønd røres til atmosfæren.

3.4 Forventede specifikationer for prototype designet

Tryktab

Efter at have testet de anvendte anlægskomponenter kan det sammenfattes, at der selv ved et forventet maksimalt flow på 15 m³/time ikke forventes

registreret et tryktab i hverken overgangs-/moniteringsstykket eller i kulfilteret. Derimod vil filter, blindrør og in-line ventil bidrage med et tryktab på omkring 1,5 mBar under forudsætning af, at boringen for passiv ventilation (PV) er filtersat ca. 25 meter under terræn. Ved de små drivtryk og i den gennemsnitlige driftssituation forventes tryktabet i systemet at være under 0,1-0,5 mBar, og det må derfor forventes, at der selv ved små overtryk i PV-boringen vil kunne generes et flow ud af systemet.



Figur 3.1
Princip for opbygning af prototype systemet. For detaljer omkring opbygning af brønd og kulfilter henvises der til Bilag 1.

Service

Servicering og vedligeholdelse af anlægget vurderes primært at omfatte skift af kul i kulfiltre, ligesom der kan forekomme behov for rengøring af en-vejs-ventiler og udluftningsbrønde. De resterende komponenter vurderes at være vedligeholdelsesfrie.

3.5 Skønnet influensradius ud fra pilotforsøg

Skønnet influensradius

På baggrund af de udførte test på de i alt 4 lokaliteter, er det skønnet, at PV-boringerne bør placeres med en indbyrdes afstand på 10-15 meter – svarende til en influensradius pr. boring på 5 – 7,5 meter. Forudsætningerne for dette valg er et skønnet gennemsnitligt luftflow ud af PV-boringerne på 0,5 – 1 m³/time, svarende til 4000 – 8000 m³ luft pr. år. Dette giver under ideelle strømningsforhold en indfangning af forureningskomponenter fra yderområdet i løbet af ~ 1 – 7 mdr., under forudsætning af en umættet zone med en tykkelse på 5-15 meter.

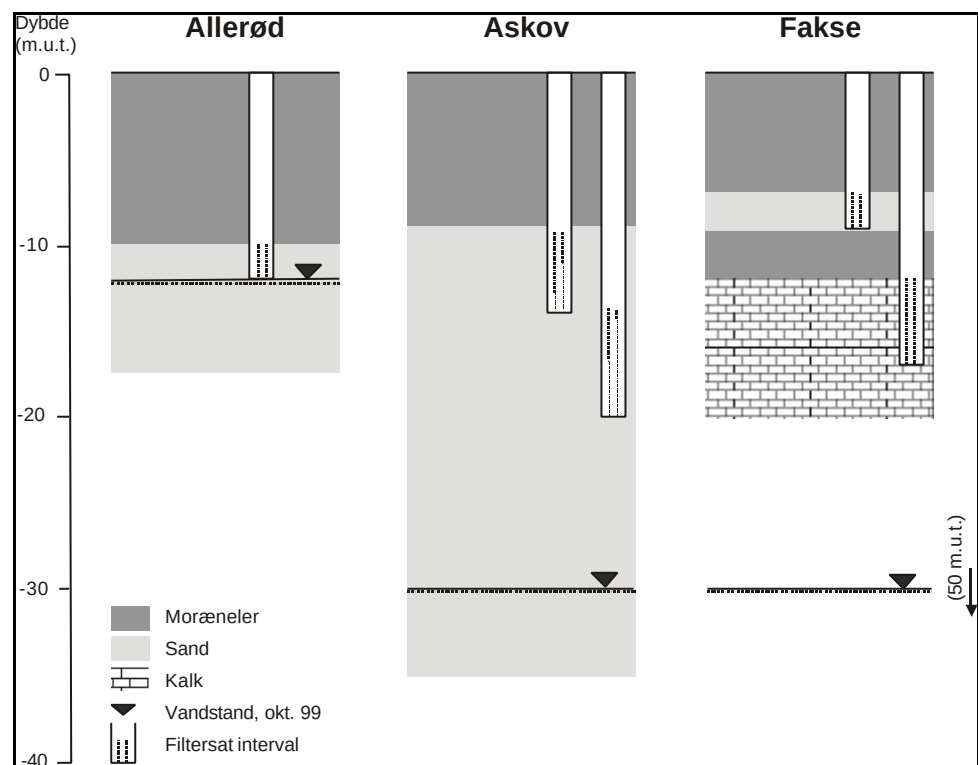
Dette indledende skøn er i kapitel 6 underkastet en nærmere vurdering på baggrund af de gennemførte 2 års drift og monitorering.

4 Beskrivelse af feltlokaliteter

4.1 Generelt om valg af lokaliteter

For at få belyst effekten af passiv ventilation (PV) under forskellige typiske geologiske forhold er der valgt 3 typelokaliteter, hhv. Nordsjælland (Allerød), Sydsjælland (Fakse) og Midtjylland (Askov). Den principielle geologi og hydrogeologi på de 3 typelokaliteter fremgår af figur 4.1. Typelokaliteten i Allerød er repræsenteret ved to grunde beliggende med få hundrede meters afstand.

Lokaliteterne repræsenterer de væsentligste magasinbjergarter i Danmark (Sand og Kalk), varierende tykkelse af den forurenede umættede zone (3-25 m), varierende dæklagstykkelser (7-15m) og varierende placering af de forurenede lag i forhold til de omgivende lag og deres permeabilitet.



Figur 4.1
Principiel geologi og hydrogeologi på feltlokaliteterne

4.2 Overordnet måleprogram

Der er implementeret en række måleinstrumenter, med det formål at kunne følge systemernes funktion over den 2-årige forsøgsperiode. Instrumenteringen inkluderer bl.a. termofølere til måling af den udstrømmende porelufts temperatur, trykmålere til registrering af differens- og atmosfæretryk, flowmeter til at måle volumenstrømmen gennem GAC-systemet og videre til atmosfæren samt vandstandstransducere. Med en frekvens på mellem 3-6 måneder er der gennemført on-line monitoring af koncentrationer (PCE, TCE, TCA, cis-1,2-DCE) for at kunne bestemme den tidlige udvikling i koncentrationer og massefjernelsesrater fra de enkelte borer.

4.3 Prins Valdemars Alle 14 og Amtsvej 2-4, Allerød

4.3.1 Geologi og hydrogeologi

Geologien på begge lokaliteter er karakteriseret ved et ca. 10 m tykt lag af moræneler, underlejret af mindst ca. 10 m smeltevandssand. Porevandsmætningen i september 1999 varierer omkring ca. 85-90% i moræneleret og ned til ca. 20-50% i det umættede sand, jf. bilag 2.2 og bilag 3.2. Den effektive luftporøsitet i den umættede zone skønnes til ca. 0,2-0,32 (-), svarende til 50-80% af totalporøsiteten. Det primære magasin udgøres af sandlaget, og det fri vandspejl findes ca. 12-15 m. Afhængig af den præcise dæklagstykkelse i den enkelte boring, er der en umættet zone i sandlaget med en mægtighed på op til ca. 2-2,5 m. Den årlige nettointiltration gennem moræneleren vurderes at være i størrelsesordenen 10-50 mm, svarende til et typisk byområde med en relativ stor befæstelsesgrad.

4.3.2 Forureningsbeskrivelse

Der er ved de indledende undersøgelser af de to tidligere renserier påvist en forurening med PCE i moræneleren på begge lokaliteter. Jordforureningen skønnes i begge tilfælde at have en horisontal udbredelse på ca. 600 m². Som udgangspunkt for massebalance-beregninger vurderes det, at porevandets gennemsnits-koncentration i dette område ligger i intervallet 0,05-5 mg/l. I den umættede zone er der ved opstarten af projektet påvist op til 300 mg PCE/m³ i poreluften. Udover PCE er der påvist spor af nedbrydningsprodukterne af PCE. I det primære grundvandsmagasin er der påvist faner med chlorerede opløsningsmidler med koncentrationer af PCE op til ca. 500-600 µg/l på selve grundene.

4.3.3 Massebalance for PCE

Med udgangspunkt i de tidligere anførte forudsætninger, kan der opstilles følgende udtryk for den årlige flux af PCE gennem moræneleren og til den umættede zone i sandlaget:

$$M_{\text{PCE}} [\text{g/år}] = \text{Areal} [\text{m}^2] \times \text{Nedsivning} [\text{m/år}] \times \text{Koncentration} [\text{g/m}^3]$$

Ved indsætning af de anførte værdiers variationsbredde kan den årlige transport af PCE til den umættede zone estimeres til mellem 0,3 og 150 g/år. Estimatet er behæftet med en væsentlig usikkerhed.



Figur 4.2
Standard system med GAC-enhed i brønd på Prins Valdemars Alle 14, Allerød.



Figur 4.3
Moniteringsbrønd med GAC-enhed fjernet. Prins Valdemars Alle 14, Allerød.

4.3.4 Installation af anlægskomponenter

På begge lokaliteter er der installeret et standardsystem som beskrevet i afsnit 3.3. Systemet består af en række filterboringer, hver med et kulfilter i en brønd og afkast ført til atmosfæren via en svane Hals. Selve filtersætningen er udført med $\varnothing 63$ mm PEH rør og er ført fra bunden af boringen og ca. 1-2 m op i moræneleren.

På lokaliteten Prins Valdemars Alle er der installeret i alt 5 boringer til passiv ventilation (PV1-PV5). Boringernes placering fremgår af situationsplanen i bilag 2.1. Boreprofiler og beregning af jordprofilets vandmætning fremgår af bilag 2.2. På figur 4.2 er vist, hvordan en typisk installation fremtræder visuelt.

4.3.5 Instrumentering

På hver af de to lokaliteter i Allerød er en af de 5 brønde udført i noget større dimension for at gøre plads til diverse datalogger-udstyr og andet måleudstyr, og der er fremført 220V. På figur 4.3 ses ned i en sådan målebrønd, hvor GAC-enheden er afmonteret. I målebrønden ses en grå box, der indeholder en standard dataopsamlingsenhed af mærket Campbell CR10X. Inde i boxen og tilkoblet dataloggeren, er der monteret et elektronisk barometer (Vaisala Model CD105), en type-K termoføler (Campbell Model 105T) til måling af overfladetemperaturen på GAC-enheden, differenstryk-transmittere (Honeywell) til måling af differenstrykket i selve boringen for passiv ventilation og i en referenceboring, filtersat i samme niveau som de passivt ventilerende boringer, men forseglet mod atmosfæren. Til måling af luftflowet ud af boringen for PV er der monteret en lufthastighedsmåler (TSI Model 8465). På billedet ses denne forbundet til den grå box med en sort ledning. Endelig er der på Amtsvej 2-4 også tilkoblet en hydrostatisk tryktransducer (Druck) til registrering af vandspejlsvariationer i det primære magasin. Data er opsamlet med en målefrekvens på 15 min., og dataloggerne er løbende tappet med bærbar PC.

På situationsplanerne for de to lokaliteter (bilag 2.1 og bilag 3.1) er der anført, hvilke parametre, der automatisk registreres i de forskellige målepunkter for de to grunde.

4.4 Nygade 37, Fakse

4.4.1 Geologi og hydrogeologi

Geologien er karakteriseret ved et dæklag af moræneler med en mægtighed på ca. 7-8 m. Herunder træffes et umættet sand-/gruslag med en mægtighed på ca. 2-4 m, hvorefter der igen træffes et morænelerslag med en mægtighed på ca. 2-3 m. I ca. 12-15 meters dybde træffes kalken. Jordprofilets poremætning ned til 10 m u.t. er ca. 85% i moræneleren og ca. 10% i det umættede sand, jf. bilag 4.2. Den effektive luftporøsitet i det umættede sandlag kan således skønnes til ca. 0,32 (-), svarende til 90% af totalporøsiteten. Kalken må formodes at være opsprækket, og dens væsentligste bulktransport-egenskaber for både vand og luft er knyttet til sprækkesystemer. Den effektive luftporøsitet i kalken er ikke målt, men skønnes til ca. 0,05 (-). Der er ikke registreret et egentligt sammenhængende sekundært magasin i de kvartære aflejringer, og kun lokalt i den øvre moræneler er der observeret et vandspejl. Det primære magasin findes i kalken, og vandspejlet er her beliggende i ca.

35-40 meters dybde. Der er således en sammenhængende umættet zone i det indlejrede sandlag og i de øvre ca. 25 m af kalken. Den årlige nettoin-filtration gennem moræneleren vurderes at være i størrelsesordenen 50-200 mm, svarende til en lav befæstelsesgrad.

4.4.2 Forureningsbeskrivelse

Der er ved de indledende undersøgelser af det tidligere renseri påvist en forurening med PCE i den øvre moræneler, lokalt op til 380 mg/kg TS. Jordforureningen skønnes at have en horisontal udbredelse på ca. 500 m². Som udgangspunkt for massebalance-beregninger vurderes det, at porevandets gennemsnitskoncentration i dette område ligger i intervallet 0,05-5 mg PCE/l. Denne opløste forurening er transporteret igennem moræneleren og til den umættede zone i sandet, hvor der ved pilotforsøg med passiv ventilation er påvist op til 260 mg PCE/m³ poreluft. Udover PCE er der påvist TCE i poreluften (op til 80 mg/m³) samt spor af nedbrydningsprodukterne af TCE. I kalken er der ved forsøg med aktiv ventilation, målt et indhold af PCE i poreluften på 3-15 mg/m³, samt nedbrydningsproduktet cis-1,2-DCE som den dominerende komponent.

Forureningskomponenterne skal bevæge sig gennem både den umættede zone i sandet og herefter en ca. 25 m tyk umættet zone i kalken for at nå selve grundvandszonen.

4.4.3 Massebalance for PCE

Med udgangspunkt i de tidligere anførte forudsætninger kan der opstilles følgende udtryk for den årlige flux af PCE gennem moræneleren og til den umættede zone i sandlaget:

$$MPCE [g/år] = Areal [m^2] \times Nedsivning [m/år] \times Koncentration [g/m^3]$$

Ved indsætning af de anførte værdiers variationsbredde kan den årlige transport af PCE til den umættede zone i sandlaget estimeres til mellem 1 og 250 g/år. Estimatet er behæftet med en væsentlig usikkerhed, og udover PCE vil der også komme et mindre bidrag af TCE.

4.4.4 Installation af anlægskomponenter

Boringer

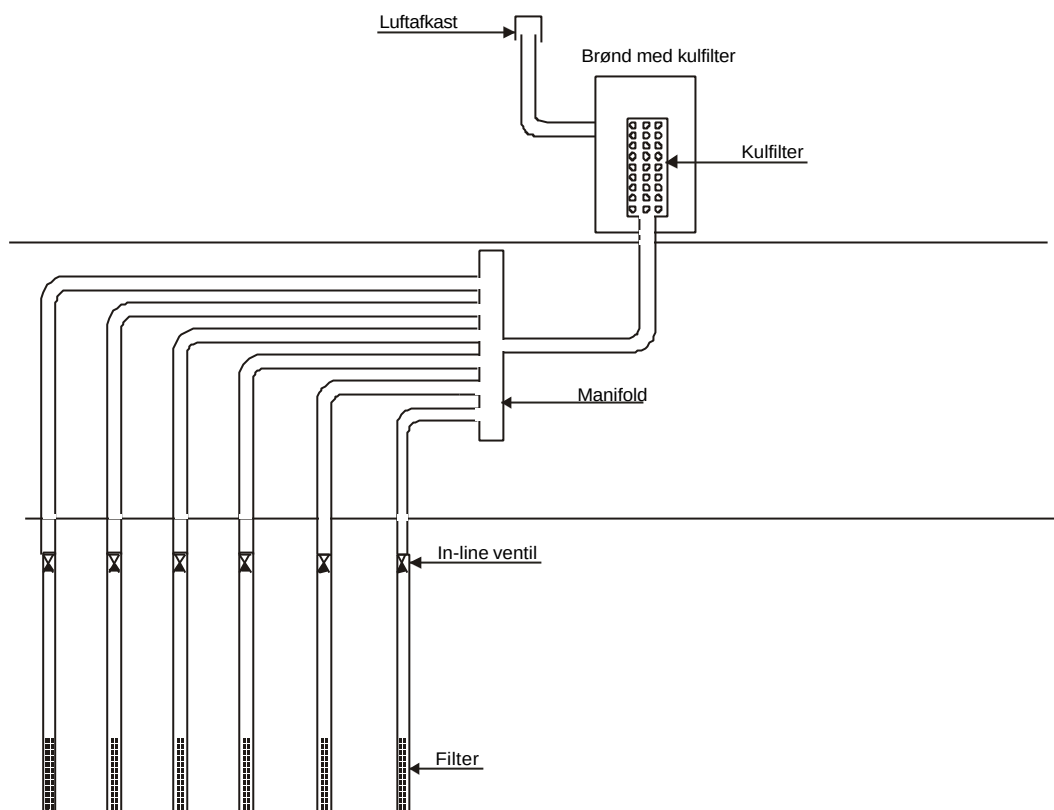
Der er etableret i alt 8 filtersatte boringer (SB1-SB6, KB1, KB2). Alle boringer er filtersat med ø63 mm PEH-filtrerrør i det umættede sandlag ca. 8-10 m u.t. To af boringerne (KB1, KB2) er ført videre ned i kalken, og der er installeret separate ø63mm PEH-filtre fra ca. 15 til 20 m u.t. Boringernes placering fremgår af situationsplanen i bilag 4.1. Boreprofiler og den målte vandmætning ned igennem profilet fremgår af bilag 4.2.

Samlet afkast

Den opstrømmende luft fra boringerne ledes via udluftningsrør frem til en manifold, hvor luften fra boringerne samles for videre fremføring til brønd med kulfilter, jf. principskitse på figur 4.4.

Der er således kun anvendt ét kulfilter, hvilket i dette tilfælde, ud fra en økonomisk betragtning, vurderes som fordelagtigt fremfor montering af kulfiltre ved hver af de etablerede boringer, da grunden er ubebygget. Beslutningen om, hvorvidt der skal monteres kulfilter ved hver af boringerne eller om den

opstrømmende luft skal samles til større afkast, skal foretages efter en afvejning af udgifterne ved installering af kulfiltre og udgifterne ved etablering af udluftningsrør til samlet afkast.



Figur 4.4
Princip for opbygning af anlæg, Nygade 37, Fakse

Samlet tryktab

Ved det valgte design anvendes der langt større længder af udluftningsrør end for prototype-systemet, og egentlige rørbøjninger forekommer også på systemet. Der må derfor forventes et noget større tryktab. Der bør derfor i forbindelse med projektering af sådanne alternative systemer foretages en vurdering af det samlede tryktab gennem systemet for vurdering af, i hvilken grad dette vil have betydning for systemets udluftningskapacitet.

Rørbøjninger

På lokaliteten er der ved et forventet maksimalt flow på 8 m³/time pr. boring estimeret et tryktab i det samlede system på omkring 3,5 mBar, mens der ved et gennemsnitligt flow på 1,5 m³/time i perioder med udstrømning er estimeret et tryktab i systemet på omkring 0,4 mBar. Langt størsteparten af tryktabet kan henføres til 90° bøjningen mellem manifold og kulfilter og skyldes, at der her er en stor hastighed og dermed turbulens i rørsystemet. Da der tidligere er observeret drivtryk på op til 7 mBar, svarende til maksimalt flow, vurderes der imidlertid ikke at være problemer med for store tryktab i systemet i Fakse.

Kulfilter

Da flowet gennem kulfilteret øges ved samling af afkastet fra de 7 boringer,

sker der samtidig en reduktion af opholdstiden. Ved et forventet maksimalt flow gennem kulfilteret i Fakse på $64 \text{ m}^3/\text{time}$, vil opholdstiden i kulfilteret reduceres til omkring 0,3 sek., hvilket er tilfredsstillende, jf. afsnit i bilag 1.6.

OML-beregning på afkast

Ved den udførte OML-beregning på systemet er der regnet med en højde af skorstenen på 2,5 meter over terræn. Der er regnet med en samlet emission på $340 \text{ mg}/\text{m}^3$ af chlorerede opløsningsmidler, primært PCE og TCE. Det dimensionsgivende flow er sat til $1,33 \text{ m}^3/\text{time} \sim 0,0004 \text{ m}^3/\text{sek.}$, svarende til det tidligere registrerede gennemsnitlige flow i perioder med flow ud af PV-boringer. Dette flow er imidlertid mindre end hvad OML-programmet kan håndtere. Det mindste flow, OML-modellen kan håndtere, er $0,01 \text{ m}^3/\text{sek.}$, hvorfor denne værdi er anvendt. Emissionerne er inden indsætning i OML-modellen omregnet til $340 \text{ mg}/\text{m}^3 \times 0,0004 \text{ m}^3/\text{sek} = 0,126 \text{ mg}/\text{sek.}$

Overholdelse af B-værdier

Den maksimale koncentration af chlorerede opløsningsmidler i udeluften er ud fra OML-modellen beregnet til omkring $0,005 \text{ mg}/\text{m}^3$ inden for en afstand af 5 meter fra skorstenen. Da B-værdien for hhv. PCE og TCE er $0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$ og $0,04 \text{ mg}/\text{m}^3$, er B-værdi-kravet overholdt med minimum en faktor 2, jf. bilag 1.7. På trods af overholdelse af emissionskravene er det alligevel valgt at montere kulfilter på det samlede afkast fra systemet, men med mulighed for senere udeladelse og derved afkast af urensset luft fra skorsten.

Aktivt system

For at undersøge muligheden for at optimere systemet af passivt ventilerende boringer, er der på en af disse boringer (KB2) monteret en lille 12V vakuum-ventilationspumpe med en maksimal ydelse på ca. $1 \text{ m}^3/\text{t.}$ Pumpen drives af strøm genereret med et enkelt solcelle-panel (100W) kombineret med en mini-vindmølle (285W). For at kunne opnå så effektiv drift som muligt, er der i brønden omkring boringen installeret 2 stk. 12V akkumulatorer og diverse elektronik til kontrol af indladningen og driften af pumpen. På figur 4.5 ses den praktiske installation på et 7 m højt stålrør. Før opstillingen blev der indhentet en tilladelse fra Fakse Kommune. Specifikationer og leverandøroplysninger på de enkelte komponenter for det aktive system er samlet i bilag 4.3.

4.4.5 Instrumentering

Datalogger

For at få plads til datalogger udstyr og andet måleudstyr er der opsat et lille målerskab og fremført 220V. I målerskabet er der placeret en standard dataopsamlingsenhed af mærket Campbell CR10X. Inde i boxen og tilkoblet dataloggeren er der monteret et elektronisk barometer (Vaisala Model CD105), differenstryk-transmittere (Honeywell) til måling af differenstrykket i selve målebrøndene og i en referenceboring filtersat i samme niveau som de passivt ventilerende boringer, men forsejlet mod atmosfæren. Til måling af luftflowet ud af et filter i både sandlaget og i kalken er der monteret lufthastighedsmålere (TSI Model 8465). På figur 4.6 ses luftflowmåleren monteret ovenpå det venstre blå blindrør, der er koblet til filtret i kalken i boring KB2. Denne flowmåler registrerer således summen af det naturlige luftflow forårsaget af variationerne i atmosfæretrykket, og flowet genereret af vakuumpumpen, når denne kører. En tilsvarende luftflowmåler er monteret på boring SB2 filtersat i sandlaget. Data er opsamlet med en målefrekvens på hvert 15. min, og dataloggeren er løbende tappet med bærbar PC.

På situationsplanen i bilag 4.1 er der anført, hvilke parametre der måles i de forskellige målepunkter.



Figur 4.5
Solcelle og vindmølle placeret på stålmast. I baggrunden ses samlebrønden hvor kulfiltret er monteret. Nygade 37, Fakse.



Figur 4.6
Mini vakuumpumpen (sort) ses under den grå box til højre i billedet. De to blå rør er tilkoblet filtrene for hhv. sandlaget og kalken. Nygade 37, Fakse.

4.5 Møllevvej 12, Askov

4.5.1 Geologi og hydrogeologi

Geologien er karakteriseret ved et ca. 6-8 m tykt lag af moræner, underlejret af mindst 70 m smeltevandssand. Jordprofilets poremætning er ikke målt direkte, men skønnes at variere omkring ca. 85-90% i moræneleret og ned til ca. 20% i det umættede sandlag. Den effektive luftporøsitet i den umættede zone i sandet kan skønnes til ca. 0,30 (-), svarende til 80% af total-porøsiteten. Det sekundære magasin udgøres af sandlaget, og det fri vandspejl findes ca. 30 m u.t. Der er således en umættet zone i sandlaget med en mægtighed på ca. 20-25 m. Den årlige nettoinfiltration gennem moræneleren vurderes at være i størrelsesordenen 50-100 mm, svarende til et område med en relativt lav befæstelsesgrad.

4.5.2 Forureningsbeskrivelse

Der er ved de indledende undersøgelser af det tidligere industrirenseri påvist en forurening med PCE i den øvre moræner, lokalt op til ca. 1 mg/kg i jordprøver og 350 µg/l i porevandet. Jordforureningen skønnes at have en horisontal udbredelse på ca. 900 m². Som udgangspunkt for massebalanceberegninger vurderes det, at porevandets gennemsnitskoncentration i dette område ligger i intervallet 0,05-5 mg PCE/l. Denne opløste forurening er transporteret igennem moræneleren og til den umættede zone i sandet, hvor der ved pilotforsøg med passiv ventilation er påvist op til 600 mg PCE/m³ poreluft. Udover PCE er der påvist et lavt indhold af TCE i poreluften. Den samlede masse af PCE i den umættede zone skønnes overslagsmæssigt til ca. 5 kg PCE, heraf er sandsynligvis 1-2 kg sorberet eller opløst i porevandet. I det sekundære grundvandsmagasin er der påvist chlorerede opløsningsmidler, med koncentrationer af PCE op til ca. 100-730 µg/l på selve grunden.

Forureningskomponenterne skal således bevæge sig gennem både dæklaget af moræner og herefter en ca. 20-25 m tyk umættet zone i sandet for at nå selve grundvandszonen.

4.5.3 Massebalance for PCE

Med udgangspunkt i de tidligere anførte forudsætninger kan der opstilles følgende udtryk for den årlige flux af PCE gennem moræneleren og til den umættede zone i sandlaget:

$$MPCE \text{ [g/år]} = \text{Areal [m}^2\text{]} \times \text{Nedsivning [m/år]} \times \text{Koncentration [g/m}^3\text{]}$$

Ved indsætning af de anførte værdiers variationsbredde kan den årlige transport af PCE til den umættede zone estimeres til mellem 2 og 450 g/år. Estimaterne er behæftet med en væsentlig usikkerhed, og udover PCE vil der også komme et mindre bidrag af TCE.

4.5.4 Installation af anlægskomponenter

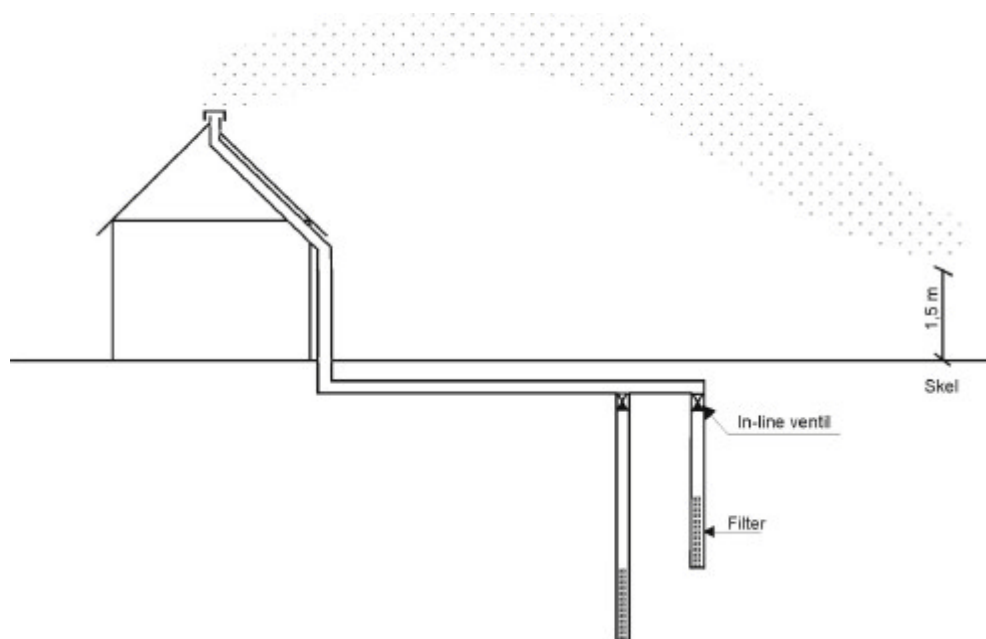
Boringer

Der er etableret i alt 6 filtersatte boringer (PV1-PV6). Alle boringer er filtersat med 2 separate 5 m lange ø63 mm PEH-filtrerrør i det umættede sandlag. Filtrene er placeret i toppen af den umættede zone, ca. 7-12 m u.t., og centralt i den umættede zone, 15-20 m u.t. I en enkelt af boringerne (PV5) er der kun

etableret et langt filter, idet dette dækker den umættede zone fra 6 til 20 m u.t. Boringernes placering fremgår af situationsplanen i bilag 5.1. Et par typiske boreprofiler og en liste over samtlige filtersætninger fremgår af bilag 5.2.

Afkast

Den udstrømmende luft fra de to filterrør i hver boring er samlet i et fælles afkast placeret i siden af brønden og ført via $\varnothing 75$ mm PVC-rør over taget på den eksisterende bygning, jf. principskitse på figur 4.7. In-line ventilerne er placeret i toppen af filtrene i selve brønden, jf. figur 4.8.



Figur 4.7

Princip for anlæg uden kulfilter og samlet afkast over tag, Møllevej 12, Askov.

Tilsvarende anlægget i Fakse, er der foretaget en OML-beregning for dokumentation af, at Miljøstyrelsens Luftvejledning /ref.1/ overholdes. Der er forudsat en gennemsnitskoncentration fra filtrene på 0,06 mg/sek. af chlorerede opløsningsmidler, primært PCE og en volumenstrøm på 0,5 m³/time.



Figur 4.8

Brønd med filterrør monteret med in-line ventiler, Møllevej 12, Askov.

Desuden er der indregnet et afkast fra en "In-Well Stripping" enhed med en emission på 12 mg/sek. Den maksimale immission er ud fra OML-modellen beregnet til 0,000174 mg/m³. B-værdien for PCE er som tidligere nævnt 0,01 mg/m³, hvorfor emissionskravet overholdes med over 50 gange.

Pilotforsøg

Der er under et tidligere pilotforsøg på lokaliteten registreret et maksimalt flow på ca. 10 m³/time pr. filter, mens det gennemsnitlige flow i perioden med udstrømning er registreret til ca. 5 m³/time. Under maksimalt flow er der registreret et maksimalt drivtryk på op til 6 mBar.

Tryktab

Under de ovenstående driftsmæssige forudsætninger kan det ikke teoretisk udelukkes, at der, på baggrund af den valgte anlægsudformning med en række enkelttab i form af rørbøjninger og i korte perioder med meget store flow, er en mulighed for problemer med tryktab, der resulterer i en begrænsning i luftudstrømningen. I praksis vurderes tryktabet i systemet imidlertid ikke at være et problem, idet luftflowet i gennemsnit er relativt lavt.

4.5.5 Instrumentering

Datalogger

For at få plads til datalogger-udstyr og andet måleudstyr er der opsat et lille målerskab og fremført 220V. I målerskabet er der placeret en standard dataopsamlingsenhed af mærket Campbell CR10X. Inde i boxen og tilkoblet dataloggeren er der monteret et elektronisk barometer (Vaisala Model CD105), differenstryk-transmittere (Honeywell) til måling af differenstrykket i selve målebrøndene og i en referenceboring, filtersat i samme niveau som de passivt ventilerende boringer, men forsejlet mod atmosfæren. Til måling af luftflowet ud af et filter i både toppen og bunden af den umættede zone er der monteret lufthastighedsmålere (TSI Model 8465) i de to filtre i boring PV4. På figur 4.9 ses målerskabet med datalogger-systemet (grå box) og de to Innova 1312 gasmålere til on-line måling af primært PCE i udstrømningsluften. Data er opsamlet med en målefrekvens på 15 min., og dataloggeren er løbende tappet med bærbar PC. På situationsplanen i bilag 5.1 er der anført, hvilke parametre, der måles i de forskellige målepunkter.



Figur 4.9
Måleskab med datalogger system og 2 stk. Innova 1312 gasmålere til on-line måling af PCE fra to filtre i boring PV4, Møllevvej 12, Askov.

Gasmålere og tracerforsøg

Gasmålerne har, udover måling af PCE-koncentrationer, også målt et evt. gennembrud af gassen CO. Denne gas har været anvendt som inert tracer til vurdering af indfangningsområdet omkring en udvalgt passivt ventilerende boring. Til disse delforsøg, udført både på Møllevvej 12 og på Nygade 37 i Fakse, er der tilsat tracer til et observationspunkt i den umættede zone, og udstyret til den praktiske dosering af traceren fremgår af figur 4.10.



Figur 4.10
Dosering af tracergas (CO) til observationspunkt, Møllevvej 12, Askov.

5 Resultater

5.1 Møllevvej 12, Askov

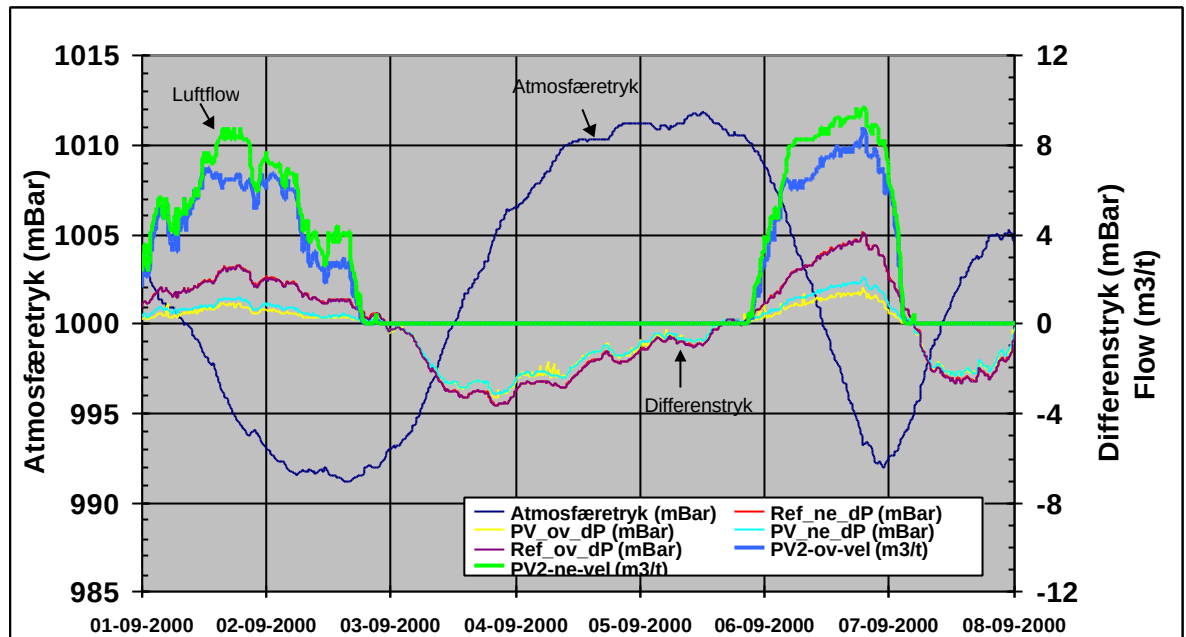
Måleresultaterne for hele den ca. 2-årige monitoringsperiode er optegnet og vedlagt i bilag 5.3-5.9. Ved gennemgangen af de målte parametre er der, for at kunne se vigtige sammenhænge, ofte kun vist data for få dage, og der henvises til bilagene for de komplette dataserier.

5.1.1 Luftflow

Den drivende kraft bag det passive luftflow ud af borerne er de naturligt forekommende variationer i atmosfæretrykket. På grund af det lavpermeable dæklag af moræner findes der stort set altid et differenstryk mellem atmosfæren og den umættede zone. Sammenhørende data for atmosfæretryk, differenstryk og grundvandsstand fremgår af bilag 5.3. Der kan umiddelbart, og som forventet, ses en større variation i atmosfæretrykket i efterårs- og vintermånederne (oktober-marts), og denne variation afspejles tydeligt i større og mere hyppigt forekommende perioder med differenstryk. Det maksimale differenstryk observeret er +10 mBar og det minimale er -9 mBar.

Vandstanden i magasinet er tydeligt påvirket af døgnvariationerne i atmosfæretrykket, og samtidig ses en årstidsvariation på ca. 0,5 m, og et generelt lavere trykniveau i 2000 i forhold til 2001. Årstidsvariationen i den umættede zones samlede tykkelse er dog kun få % (0,5 m i forhold til 25 m), og vurderes derfor ikke at påvirke de observerede luftflow.

Til illustration af den generelle sammenhæng mellem de forskellige måleparametre er der udvalgt 1 uges målinger fra september 2001, jf. figur 5.1.



Figur 5.1
Observationer af atmosfæretryk, differenstryk og luftflow i september 2001, Møllevej 12, Askov.

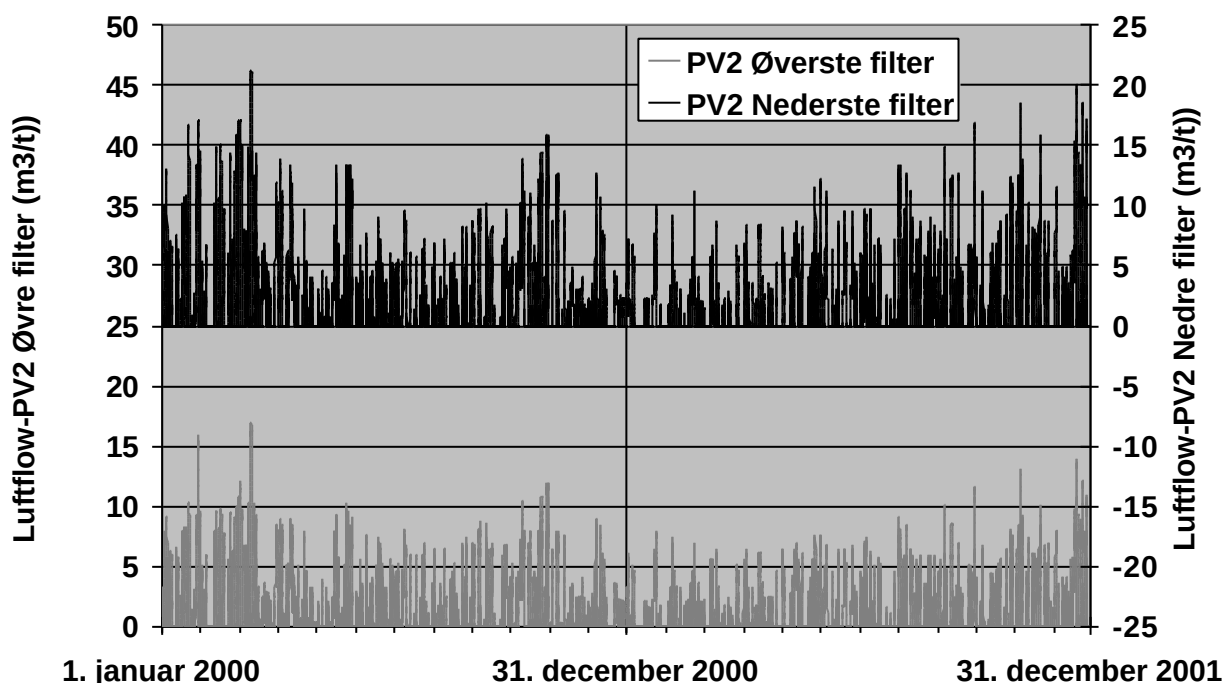
Perioden omfatter passagen af to lavtryk, hvorunder atmosfæretrykket falder med en rate på op til 1 mBar/time over 24-36 timer. Som følge heraf genereres der under faldende atmosfæretryk et positivt differenstryk på op til 4 mBar i de to filtre (Ref_ov_dP, Ref_ne_dP) i referenceboringen (DGU 132.1735), som er forseglet mod atmosfæren og beliggende i ca. 20 m's afstand fra den nærmeste passivt ventilerende boring. Samtidig med at differenstrykket bliver positivt, begynder poreluft at strømme ud af den passivt ventilerende boring PV2's to filtre (PV2_ov_vel, PV2_ne_vel). Luftflowet ud af de to filtre når begge et maksimum på ca. 7-9 m³/t, men tidspunktet herfor er ikke nødvendigvis sammenfaldende med tidspunktet for atmosfæretrykkets minima. Dette ses tydeligt for den første lavtrykspassage, hvor det maksimale luftflow optræder ca. 24 timer før atmosfæretrykkets minima, mens der for den anden lavtrykspassage ikke ses nogen tidsforskel.

Årsagen til denne forskel er, at raten, hvormed atmosfæretrykket aftager (mBar/time) ved den første lavtrykspassage, bliver mindre mod slutningen af lavtrykspassagen, og at trykudligning til atmosfæren derfor reducerer den fortsatte opbygning af differenstrykket. For den anden lavtrykspassage ses raten (mBar/time) at være stort set konstant, indtil få timer før atmosfæretrykkets minima indtræffer, hvorfor differenstrykket og dermed flowet også fortsætter med at stige, indtil få timer før dette minima. At der må ske en løbende trykudligning gennem dæklaget ses ved, at atmosfæretrykket i perioden 3-4 september stiger ca. 13 mBar, mens differenstrykket kun stiger med 4 mBar. Da en-vejs-ventilerne i denne periode er lukkede, sker der ikke luftudveksling mellem den umættede zone og atmosfæren igennem borerne, men alene igennem dæklaget. Såfremt dæklaget havde været meget lavpermeabelt, skulle den registrerede ændring i atmosfæretrykket have betydet en tilsvarende ændring i differenstrykket.

De installerede en-vejs-ventiler fungerer efter hensigten, idet der ikke kan måles noget luftflow ned i borerne i perioder med negativt differenstryk. I

overensstemmelse hermed, viser de to referencefiltre (Ref_ov_dP, Ref_ne_dP) og de to filtre i selve den passivt ventilerende boring PV2 (PV_ov_dP, PV_ne_dP) identiske differenstræk i perioden 3.-6. september 2000, idet alle filtre er afspærret mod atmosfæren. I de to perioder med udstrømmende poreluft ses, at der i selve filtret (PV_ov_dP, PV_ne_dP) er et svagt overtryk på op til ca. 1-2 mBar, mens der i referencefiltrene er op til ca. det dobbelte. Generelt indikerer data, at det samlede tryktab under luftens passage igennem først selve en-vejs-ventilen, herefter brønden (se figur 4.8) og endelig via rørsystemet til afkast over tag (se figur 4.7), er op til ca. 30-50% af det drivtryk, der er til rådighed.

Atmosfæretrykkets årstidsvariation afspejles direkte i luftflowet registreret i de to filtre i boring PV2, jf. figur 5.2. De hyppigste perioder med udstrømning og de største absolutte flow ses som forventet i vinterhalvåret. Der observeres generelt et lidt større flow i det nedre filter, hvilket primært vurderes at kunne henføres til en lidt større permeabilitet i dybdeintervallet for det nederste filter, idet de to filtre i øvrigt er lige lange og de registrerede reference-differenstræk i de to dybder er nær identiske, jf. figur 5.1. Figur 5.2 illustrerer den karakteristiske pulserende karakter af luftflowet fra de passivt ventilerende boringer. Dette flowmønster observeres i samtlige filtre, og ud fra samtidige øjebliksmålinger af luftflowet i samtlige 11 filtre kan udstrømningsmønsteret i de enkelte filtre tilnærmet beregnes ved skalering i forhold til den kontinuert målte variation af luftflowet i det øvre filter for PV2. Baseret på disse tidsserier, kan der udføres simpel deskriptiv statistik til beskrivelse af forskellige egenskaber for den passive luftudstrømning, jf. tabel 5.1 og bilag 5.4



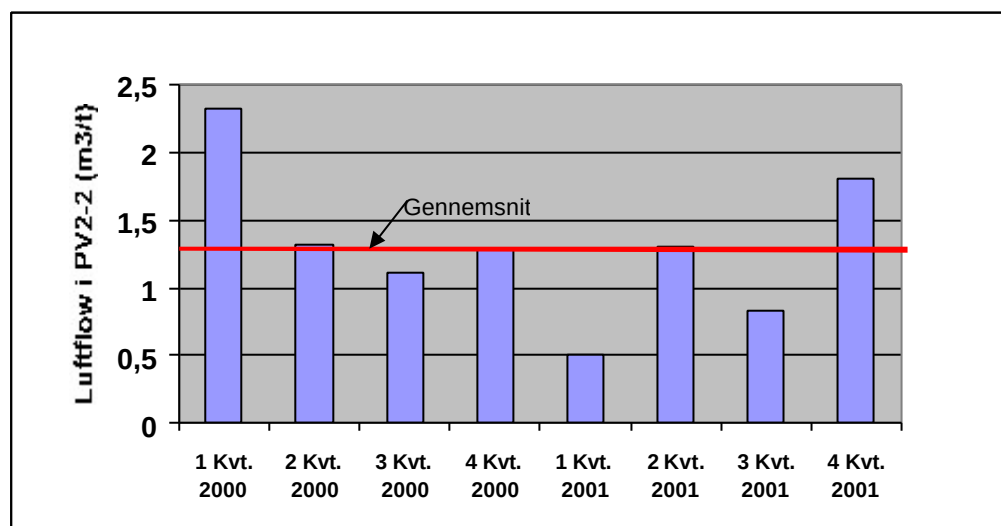
Figur 5.2
Variationen i luftflowet ud af filtrene i PV2, Møllevej 12, Askov.

Flow fra enkeltfiltre:	
Minimalt årligt middel luftflow findes i PV2-2	1,4 m ³ /t
Maksimalt årligt middel luftflow findes i PV3-1	2,9 m ³ /t
Gennemsnitligt årligt middel luftflow for de 11 filtre i PV1-PV6	2,2 m ³ /t
Maksimalt øjeblikkeligt luftflow findes i PV3-1	32 m ³ /t
Statistik på serie med luftflow i PV2-1 øvre:	
Antal udstrømningsperioder	382
Gennemsnitlig varighed af en enkelt udstrømningsperiode	16 timer
Gennemsnitlig afkastet luftvolumen pr. udstrømningsperiode	60 m ³
Samlet tidsmæssig varighed af udstrømningsperioder	42 %
Flow fra totalsystemet med i alt 11 enkelt filtre i PV1-PV6:	
Samlet årligt middel luftflow	23,7 m ³ /t
Samlet øjeblikkeligt maksimalt luftflow	261 m ³ /t

Tabel 5.1

Simple statistiske egenskaber for variationen af luftflowet i perioden 2000-2001. Middelflow omregnet til årlige værdier, idet der kun sker udstrømning af poreluft i ca. 50% af tiden, Møllevej 12, Askov.

Som det fremgår af tabel 5.1, er det gennemsnitlige årlige luftflow fra et enkelt 5 m langt filter ca. 2,2 m³/t, mens der kortvarigt har været luftflow på over 30 m³/t. For kvantitativt at belyse luftflowets variation henover året, er det gennemsnitlige flow i hvert kvartal opgjort for PV2-1 (øvre) og afbildet på figur 5.3.



Figur 5.3

Kvartalsvis variation i luftflowet ud af filtret PV2-1 (øvre) i perioden 2000-2001, Møllevej 12, Askov.

Der kan indenfor den relativt korte måleperiode på 2 år registreres markante forskelle i det samlede luftflow i de enkelte kvartaler. Det største flow forekommer i første kvartal 2000 (januar-marts), mens det mindste flow optræder i det samme kvartal i 2001. Der er således en variation på ca. 50% i forhold til det samlede årgennemsnit. Analyser af en længere dataserie for atmosfæretrykket (1990-2000) indikerer, at der kan forventes større flow i efterår/vinter sammenlignet med forår/sommer. Derfor må den samlede måleperiode på grund af 4 kvrt. 2000 og 1 kvrt. 2001 betegnes som atypisk, men også et udtryk for den meteorologiske variabilitet.

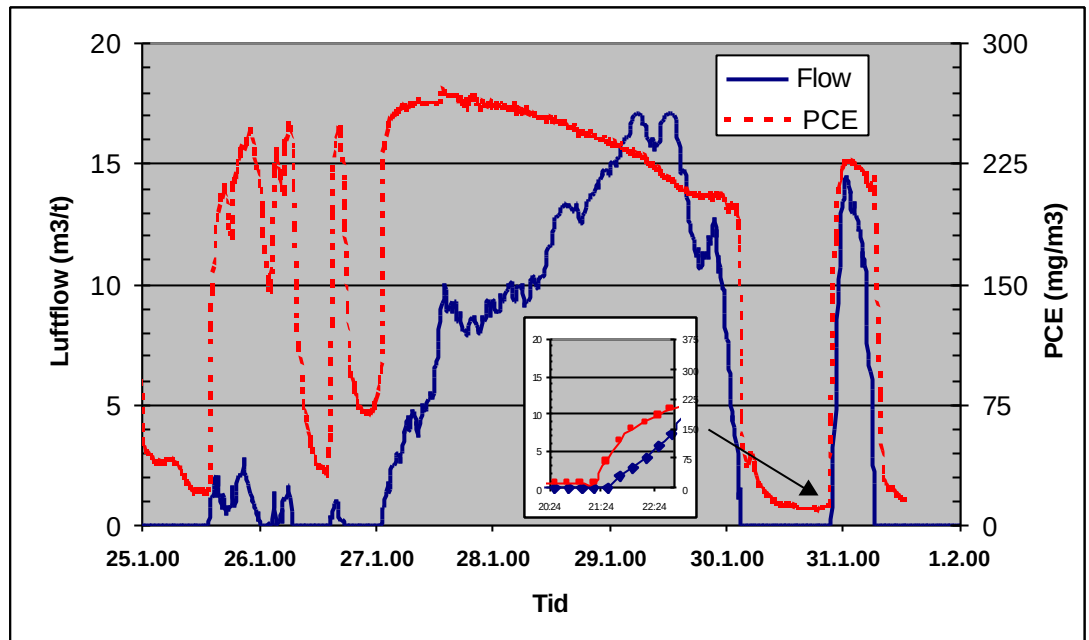
Der har i alt været registreret 382 udstrømningsperioder med en varighed større end 2 timer, jf. tabel 5.1. Udstrømningsperioderne har haft en gennemsnitlig varighed på 16 timer og med et gennemsnitligt afkastet luftvolumen på 60 m^3 . Forskellen i gennemsnits- og maksimalflow mellem PV5, der som den eneste har et 14 m langt filter, og de 5 m lange filtre i PV1-PV4 og PV6 er illustreret i bilag 5.4. Data indikerer, at det maksimale luftflow ud af det lange filter er ca. $32,8 \text{ m}^3/\text{t}$, og således kun ca. 50% større end gennemsnittet for det maksimale flow på $23 \text{ m}^3/\text{t}$ for de 5 m lange filtre. Årsagen til, at en tredobling af filterlængden ikke giver en tredobling af flowet, er sandsynligvis, at tryktabet i selve filterrøret og en-vejs-ventilen ved flow over $20\text{-}25 \text{ m}^3/\text{t}$ virker begrænsende på det maksimalt opnåelige flow. Tilsvarende observeres et gennemsnitsflow på $2,0 \text{ m}^3/\text{t}$ for de 5 m lange filtre og på $3,0 \text{ m}^3/\text{t}$ for det 14 m lange filter i PV5. Denne forskel på kun ca. 50% vurderes også at kunne henføres til tryktab og deraf følgende lavere flow i perioder med store differensterik. Hvis der kun skal anvendes ét filter, vil det således være fordelagtigt at øge dimensionen på filtret fra $\varnothing 63 \text{ mm}$ til $\varnothing 125 \text{ mm}$, for herved at få en optimal udnyttelse af differensterikket. I den forbindelse vil det så være nødvendigt at lave en en-vejs-ventil i denne dimension, idet standardmodellen til $\varnothing 63$ vil have et for stort tryktab.

For det totale system (11 enkeltfiltre), kan det gennemsnitlige årlige luftflow skønnes til ca. $24 \text{ m}^3/\text{t}$, jf. tabel 5.1. Det maksimale flow er i en kortvarig periode ca. $260 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket svarer til et gennemsnitligt luftflow for hver af de seks boringer på ca. $45 \text{ m}^3/\text{t}$.

5.1.2 Poreluftkoncentrationer

For at følge udviklingen i poreluftens koncentration af PCE i måleperioden, er der gennemført en række målinger i de 11 passivt ventilerende filtre, samt i en enkelt afblændet boring med to filtre (DGU 135.1735), jf. bilag 5.1. Der er udført i alt 8 monitoringsrunder, hvor koncentrationerne af den udstrømmende luft er målt over ca. 15 min., svarende til i alt 15 enkeltmålinger. Herudover er der i hver af de to filtre i PV2 udført 4 kontinuerte måleserier med 15 min. intervaller af 1-3 ugers varighed, med det formål at få indsigt i variationen af koncentrationen over flere efterfølgende udstrømningsperioder. Samtlige måledata er afbildet i bilag 5.5.

Til illustration af et typisk driftsforløb, er der på figur 5.4 afbildet 1 uges data for luftflow og koncentrationen af PCE i den udstrømmende poreluft fra boring PV2-1.



Figur 5.4

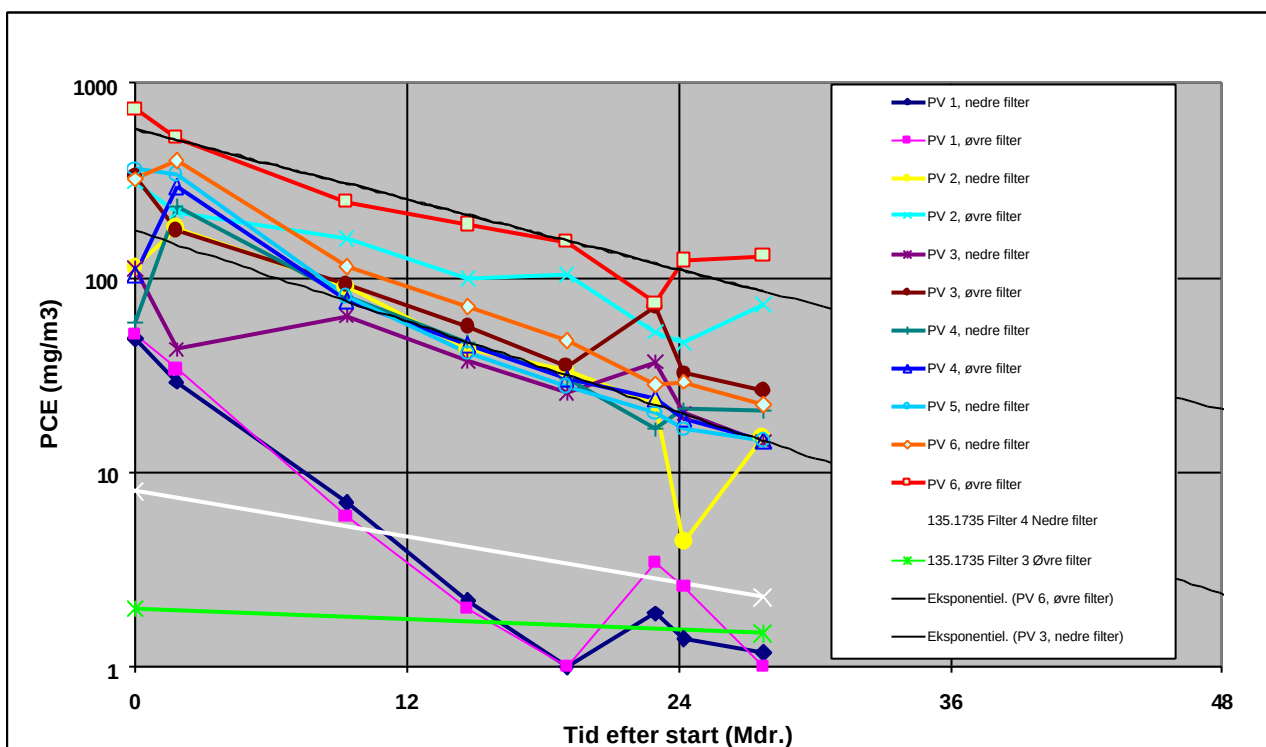
Variation i luftflow og PCE-koncentration fra filtret PV2-1 (øvre) i perioden 25.1-1.2 2000, Møllevej 12, Askov.

Der kan ses i alt 5 separate perioder med udstrømning af poreluft med en varighed fra få timer og et samlet afkastet luftvolumen på ca. 2 m^3 , og op til en varighed på lidt over 3 dage og et samlet afkast på ca. 800 m^3 . De maksimale flow for de to ekstreme perioder varierer fra ca. $2 \text{ m}^3/\text{t}$ og op til ca. $18 \text{ m}^3/\text{t}$. Denne markante variation i udstrømningsforløbet har tilsyneladende ikke afgørende betydning for den maksimale PCE-koncentration i hver periode med udstrømning. Den maksimale koncentration ved de 3 første perioder med en relativ kortvarig udstrømning når op på ca. 90% af det maksimale niveau på ca. $270 \text{ mg PCE}/\text{m}^3$. Udsnittet på 2,5 timer på figur 5.4 viser de enkelte måledata pr. 15 min. for en periode lige omkring starten af den sidste udstrømningsperiode. En meget vigtig observation er her, at koncentrationen stiger meget hurtigt og når op på 25% hhv. 75% af det maksimale niveau efter 15 min. hhv. 45 min. Dette har det praktiske aspekt ved monitoring, at der kan opnås et niveau på over 75% af det maksimale, såfremt udstrømningen har været aktiv ca. 1 time, førend målingerne påbegyndes. Dette viser også, at de anvendte en-vejs-ventiler effektivt hindrer atmosfærisk luft i at strømme ned i filtret, idet dette ville give anledning til fortynding af poreluftens indhold af PCE, og dermed meget lavere koncentrationer ved begyndelsen af hver ny udstrømningsperiode.

Betragtes den længste udstrømningsperiode på ca. 3 døgn, kan det beregnes, at boringen har trukket luft ind fra en afstand af ca. 10 m. Det tydelige koncentrationsfald fra 275 til $205 \text{ mg-PCE}/\text{m}^3$ over de 3 dage indikerer således, at der generelt er høje koncentrationer ($>200 \text{ mg PCE}/\text{m}^3$) indenfor en afstand af ca. 10 m fra boringen. Faldet indikerer også, at der trækkes noget mindre forurenet poreluft til fra området mod syd, hvor der er relativt lavere koncentrationer, jf. næste afsnit.

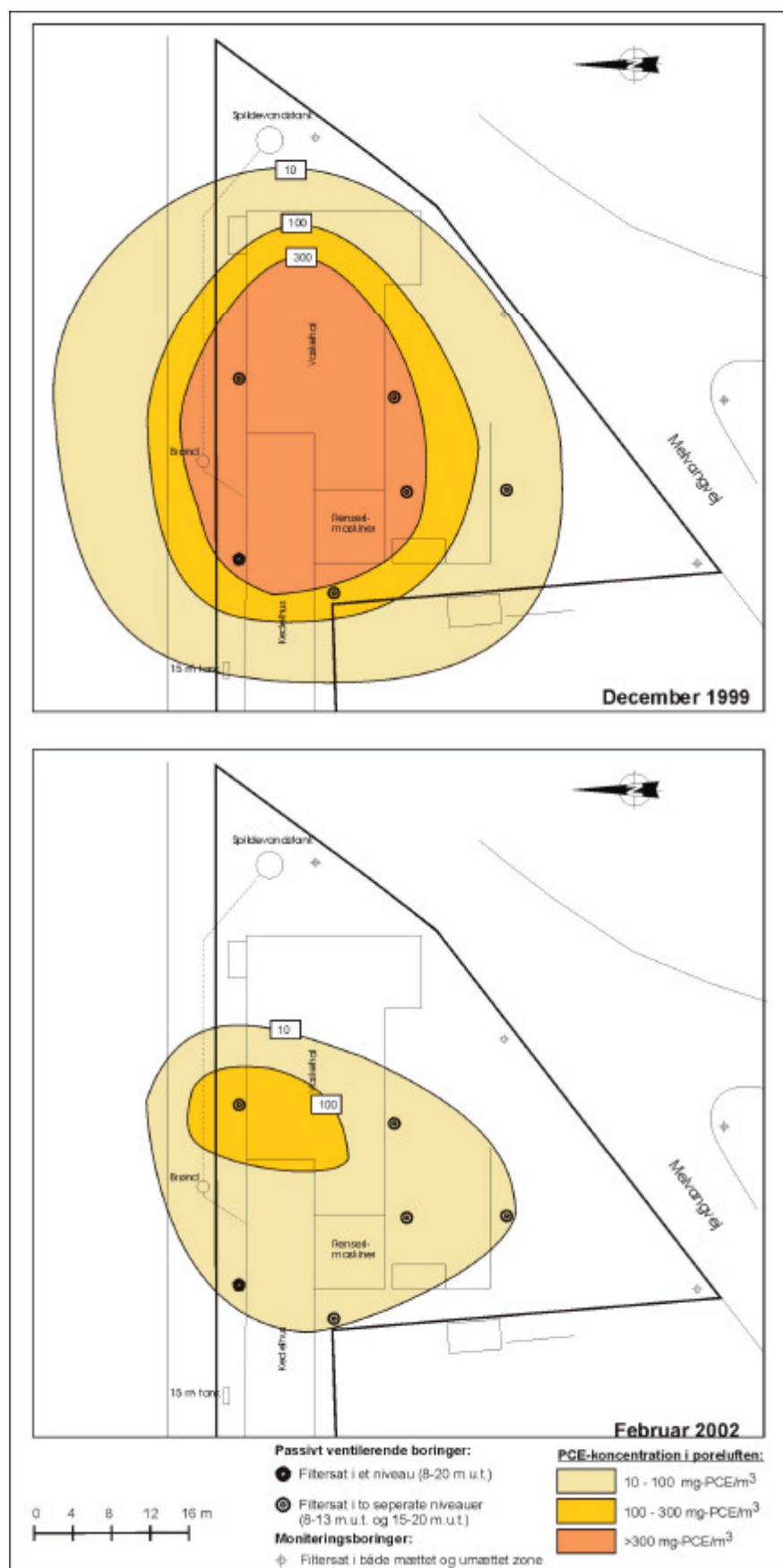
Resultaterne af de 8 målerunder er afbildet logaritmisk på figur 5.5, mens de samme data i bilag 5.5 er afbildet på en lineær skala. Der kan overordnet registreres et aftagende koncentrationsniveau for alle filtre, uanset startkoncentrationen.

På nær de fire filtre med de laveste koncentrationer, kan de aftagende koncentrationer beskrives med stort set den samme eksponentielle rate. En enkel boring (PV1 nedre + øvre filter) viser en noget større eksponentiel rate. Dette kan skyldes, at den ligger i udkanten af den oprindelige "sky" af poreluftforureningen, jf næste afsnit. For boringen 135.1735, der ligger i fronten af den oprindelige "sky" og alene anvendes til monitorering, ses en svagt aftagende koncentration. Denne effekt vurderes at kunne forklares af den generelle lufttransport fra dette område og ind mod det centrale område, hvor de passivt ventilerende boringer står.



Figur 5.5
Tidslig variation i den udstrømmende porelufts indhold af PCE. Samtlige filtre i perioden 2000-2002 (0-29 mdr.), Møllevej 12, Askov.

I løbet af de første 21 mdr. er koncentrationen af PCE generelt reduceret til under 75 mg/m³ i alle filtre, og i hovedparten til under 25 mg/m³. Specielt efter ca. 22 mdr. og igen efter 29 mdr., svarende til perioden nov. 2001 til apr. 2002, observeres der dog en vis stigning i enkelte filtre. Stigningen kan skyldes en større nettonedsivning gennem dæklaget i denne periode, som følge af den rekordstore nedbør. Antages, at det generelle eksponentielle fald i koncentrationer fortsætter i de kommende år, er der på figur 5.5 vist det forventede forløb for hhv. PV6-Øvre og PV3-Nedre, der repræsenterer de kraftigt hhv. svagt forurenede filtre. For de



Figur 5.5-a
Horizontal udbredelse af PCE i poreluften ved start og slut af måleperioden. Møllevvej 12, Askov.

svagt forurenede filtre kan der efter 36 mdr. hhv. 48 mdr. forventes koncentrationer på 10-20 mg/m³ hhv. 1-10 mg/m³. Tilsvarende for de kraftigst forurenede, kan der efter 36 hhv. 48 mdr. forventes koncentrationer på 20-50 mg/m³ hhv. 10-20 mg/m³.

Den procentvise reduktion i poreluftens indhold af PCE for de enkelte filtre er opgjort i tabel 5.2. Reduktionen varierer fra ca. 67% til ca. 96%, med en middelværdi på ca. 84%. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel imellem de nedre og øvre filtre. Gennemsnitskoncentrationen er endvidere reduceret fra 230 til 32 mg/m³.

Dato	17-12 1999	16-11 2001	Reduktion
Måneder fra start	0	23	(%)
PV 1, nedre filter	49	2	96,1
PV 1, øvre filter	51	3	93,3
PV 2, nedre filter	113	23	80,1
PV 2, øvre filter	309	53	82,9
PV 3, nedre filter	112	37	67,2
PV 3, øvre filter	329	71	78,5
PV 4, nedre filter	59	17	71,9
PV 4, øvre filter	104	24	76,7
PV 5, nedre filter	359	20	94,4
PV 6, nedre filter	318	28	91,1
PV 6, øvre filter	730	75	89,8
Middel	230	32	83,8

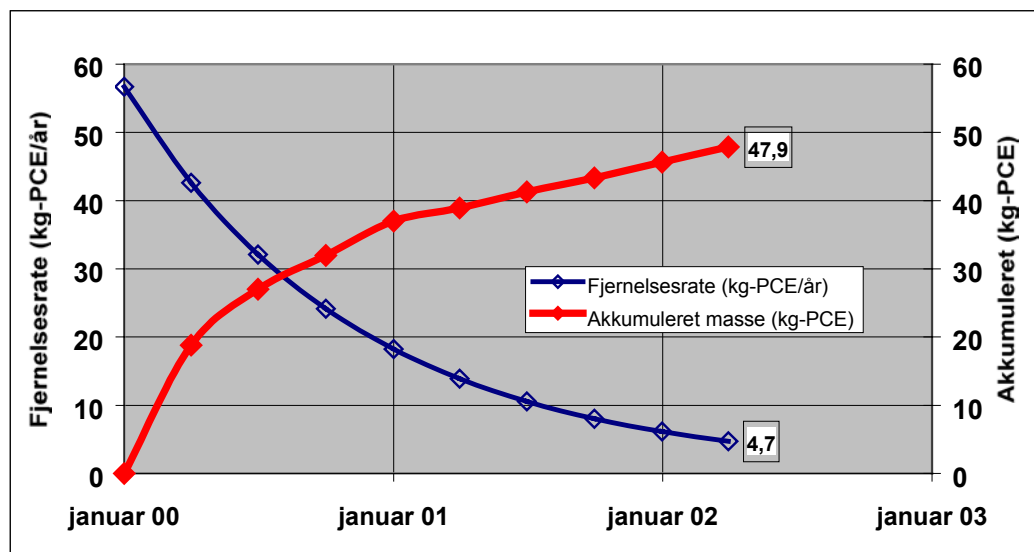
Tabel 5.2
Absolut reduktion i poreluftens indhold af PCE (mg/m³) i perioden 2000-2001, Møllevvej 12, Askov.

Effekten af den passive ventilation på den horisontale udbredelse af PCE for perioden december 1999 til februar 2002 er afbildet i bilag 5.6. Området med koncentrationer over 300 mg/m³ er forsvundet, og de maksimale koncentrationer findes nu kun i et lille område omkring PV6 med niveauer omkring 100 mg/m³. Tilsvarende er området med 100 mg/m³ blevet reduceret væsentligt. I det ydre område med lave koncentrationer mellem 10 og 100 mg/m³ er der enkelte målepunkter kendetegnet ved alene at være monitoringsboringer. Det vurderes, at den generelle 10 mg/m³ konturlinie er trukket ca. 5-10 m ind mod de passivt ventilerende boringer. Denne tilbagetrækning på ca. 2-5 m/år er nettoeffekten af to modsatrettede mekanismer hhv. molekylær diffusion væk fra kildeområdet og advektiv gastransport ind mod de passivt ventilerende boringer. Der er således tydelige indikationer på, at de passivt ventilerende boringer over tid er i stand til at forhindre en videre horisontal spredning – og sandsynligvis reducere denne yderligere.

5.1.3 Massefjernelsesrate

Massefjernelsesraten fra en passivt ventilerende boring er en funktion af både luftflow og koncentration. På baggrund af de beregnede tidsserier for de enkelte filtre, jf. afsnit 5.1.1, og de eksponentielt aftagende koncentrationer, vist på figur 5.5, er der med tidsskridt på 15 min. beregnet en gennemsnitsfjernelsesrate for dette tidsskridt. Akkumuleres denne serie, fås den samlede

masse, der er fjernet fra boringen. Ved at akkumulere bidraget for samtlige 11 filtre fås det samlede systems karakteristik, jf. figur 5.6. De beregnede massefjernelsesrater for både enkeltboringer og det samlede system fremgår af bilag 5.7.



Figur 5.6
Fjernelsesrate og akkumuleret mængde PCE fra samtlige filtre i perioden 2000-2002 (0-29 mdr.), Møllevvej 12, Askov.

Den initiale fjernelsesrate er ca. 55 kg PCE/år, og aftager som forventet eksponentielt, jf. figur 5.6. Fjernelsesraten ved afslutningen af forsøget efter 29 mdr. er faldet med én størrelsesorden til ca. 5 kg PCE/år. Med det forventede yderligere fald i koncentrationen over de næste par år, vil fjernelsesraten sandsynligvis komme ned på ca. 1 kg/år. Af enkeltfiltre bidrager det øvre filtre PV6-1 med de ca. 13 kg, svarende ca. 25% af totalmængden, mens de resterende filtre er mere ensartede og fjerner 3-6 kg, jf. bilag 5.7.

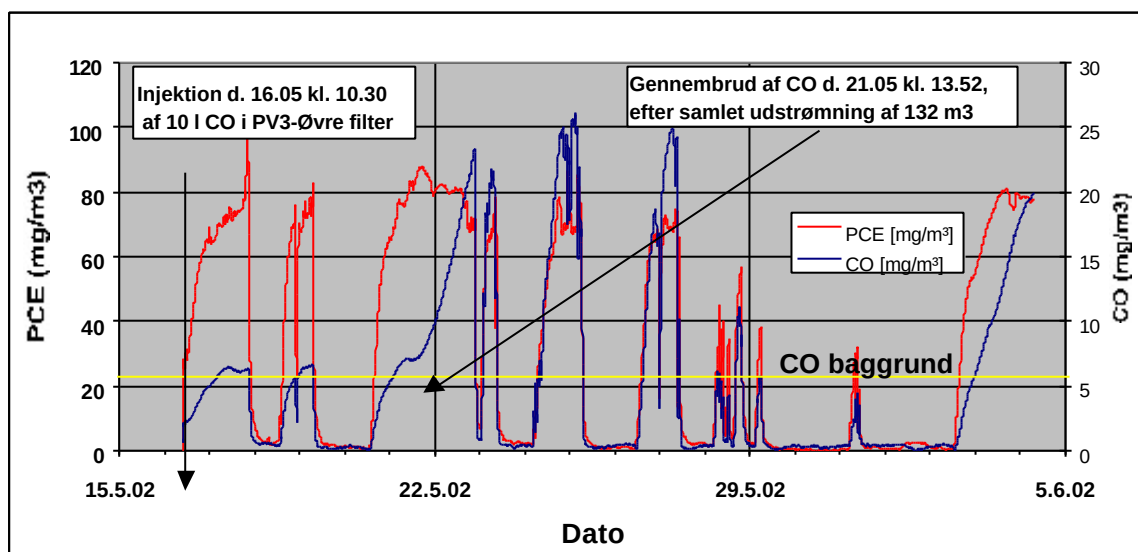
Betragtes den akkumulerede kurve, vurderes det, at der i løbet af det første driftstår er fjernet ca. 35 kg PCE, mens der i andet driftsår er fjernet ca. 10 kg PCE. For hele måleperioden på 29 mdr. vurderes der at være fjernet ca. 45 kg PCE. Udfra det samlede datasæt, vurderes det, at den samlede akkumulerede mængde PCE vil stige til 50-60 kg i løbet af de næste par år, hvorefter den kun vil stige svagt, svarende til den forventede årlige fjernelsesrate på ca. 1 kg/år.

5.1.4 Tracerforsøg

For yderligere at beskrive det luftstrømningsmønster, som skabes omkring en passivt ventilerende boring, er der gennemført et tracerforsøg på det øverste 5 m lange filter i boring PV2. Forsøget er initieret d. 16/5 2002 ved at injicere 10 l CO gas ved en rate på 1 l/min. i det øvre 5 m lange filter i den nærliggende boring PV3. Afstanden mellem PV2 og PV3 er ca. 12 m. Herefter er både det øvre og det nedre filter i PV3 afblændet for at undgå, at boringen påvirker transporten af traceren i den umættede zone. Af de øvrige passivt ventilerende boringer, der har været i drift under forsøget, ligger de to nærmeste 15 hhv. 20 m væk fra PV2, jf. bilag 5.1. I perioden 15/5-6/6 2002 er

der hvert 15. min. målt indhold af PCE og CO i afkastluften fra det øvre filter i PV2, og samtlige forsøgsdata er afbildet i bilag 5.8.

De målte PCE- og tracer-koncentrationer under det 3 uger lange forsøg er afbildet på figur 5.7. I den første uge efter injektionen observeredes først to separate udstrømningsperioder, hvor CO-koncentrationen ligger under baggrunds niveauet, mens PCE koncentrationen viser et stabilt maximalt niveau på ca. 85 mg-PCE/m³. Omkring 1 døgn inde i den 3. udstrømningsperiode observeres et stigende CO-indhold, og under de efterfølgende 2 udstrømningsperioder opnås stabile maksimale CO-koncentrationer omkring 25 mg/m³. Herefter ses et par meget små kortvarige udstrømningsperioder, hvor hverken PCE- eller CO-koncentrationen når op på deres maksimale niveauer, og forsøget afsluttes med en længere udstrømningsperiode, hvor både PCE –og CO-koncentrationen næsten når op til det tidligere niveau. Den relativt jævne stigning i koncentrationen af CO ved starten af gennembruddet og igen ved den sidste udstrømningsperiode indikerer, at fronten hhv. halen af den injicerede ”tracer-sky” har nået boringen. En massebalance for CO viser, at der er opsamlet 50% af den injicerede mængde. Årsagen til at der ikke opnås en 100% opsamling er – udover at forsøget skulle have kørt lidt længere tid, at tracergassen fortyndes naturligt ved diffusion i alle retninger, og at der samtidig sker strømning i retning af de omkringliggende passivt ventilerende boringer. Endvidere kan der ske en vis vertikal spredning og dermed yderligere fortynding



Figur 5.7

Tracerforsøg på det øvre filter i PV2. Tidslig udvikling i PCE og CO-koncentration under forsøget i perioden 15/5-5/6 2002, Møllevvej 12, Askov. (CO baggrund er her udtryk for detektionsgrænsen for CO, der er stærkt forhøjet pga. interferens mellem de målte stoffer).

Fra injektionstidspunktet og til starten af gennembruddet er der passivt ventileret 132 m³ luft fra det øvre filter i PV2. Denne luftmængde kan under simple antagelser omregnes til en minimal afstand fra PV2, hvorfra luften kan være trukket. Antages at den horisontale lufthastighed i niveauet for filterne er horisontal og jævn over hele den filtersatte dybde på 5 m og radiært rettet i mod PV2 fra alle retninger, samt at den effektive luftporøsitet er ca. 0,30, kan den minimale afstand beregnes til ca. 5 m. Denne afstand er under halvdelen af den faktiske afstand på 12 m, og denne tendens er observeret i flere andre lignede tracerforsøg. At gennembruddet sker væsentligt førend forventet ud fra

den simple beregning, skyldes, at antagelsen om en homogen hastighedsfordeling ikke er korrekt. Der vil dels på poreskala-niveau være en andel af de større porer, som er luftfyldte og sammenhængende, og hvorigennem den advektive transport sker relativt hurtigt, mens der i en del af de mindre porehulrum vil findes delvis afsnørede luftfyldte porer, hvor luften kun langsomt kan strømme igennem. Der er sandsynligvis også en vis vertikal variation i permeabiliteten, hvilket giver en uens lufthastighed over dybden.

Ved en traditionel fortolkning af en gennembrudskurve ser man på tiden og volumen et oppumpet, svarende til at 50% af traceren er genfundet, og beregner på baggrund heraf en middelhastighed. I dette tilfælde er der ved forsøgets afslutning opnået ca. 50% genfinding af traceren, svarende til at i alt 615 m^3 luft er passivt ventileret fra boringen. Med samme antagelser som ovenfor omkring strømningsmønstret og anvendelse af middelhastigheden fås en middelaflastning fra PV2 på ca. 11,5 m. Den gode overensstemmelse mellem denne fortolkning af tracer-testen og den faktiske afstand indikerer, at den vertikale variation i permeabiliteten ikke er særlig stor.

5.1.5 Grundvandsanalyser

Fra 3 boringer er der udtaget vandprøver fra toppen af det primære grundvandsmagasin til analyse for chlorerede opløsningsmidler. Boringerne er beliggende nedstrøms kildeområdet og vurderes at være udenfor påvirkningsområdet for afværgetiltaget med In-Well aereator-systemet placeret på den vestligste del af grunden. Analyseresultaterne er afbildet i bilag 5.9.

Koncentrationerne udviser en samlet aftagende trend, herunder boring PV1, som samtidig er en passivt ventilerende boring. Det vurderes, at de observerede reduktioner i specielt PV1 og DGU 132.1735.02 skyldes den stærkt reducerede poreluftforurening i den umættede zone. På grund af de få målinger, og den tidsforsinkelse, der er fra grundvandet, der strømmer fra kildeområdet og til monitoringsboringerne, er det endnu for tidligt at vurdere, hvor langt ned koncentrationerne vil nå.

5.1.6 Samlet massebalance

Under de første 2 års drift er der fjernet 50-60 kg PCE, og antages det, at denne mængde PCE er tilført den umættede zone over en ca. 30 års periode, svarer det til en kildestyrke på ca. 2 kg/år. Kildestyrken kan også vurderes ud fra den forventede årlige fjernelsesrate efter længere tids drift (2-4 års drift) på ca. 1 kg, jf. afsnit 5.1.3. Endelig er den årlige udvaskning gennem dæklaget tidligere bestemt til under 0,5 kg/år, jf. afsnit 4.5.3.

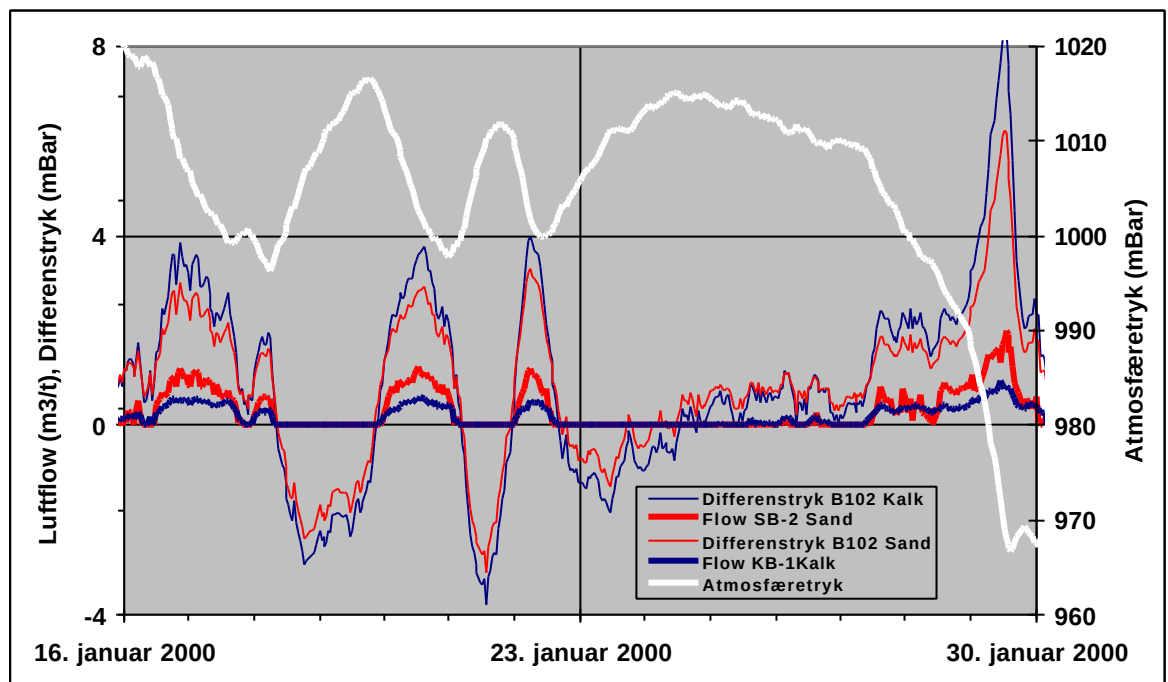
Der må forventes en vis variation i kildestyrken fra år til år, men ud fra det samlede datasæt vurderes det, at den årlige kildestyrke til den umættede zone i sandlaget er ca. 1 kg PCE.

5.2 Nygade 37, Fakse

Måleresultaterne for hele den 2-årige monitoringsperiode er optegnet og vedlagt i bilag 4.3-4.10. Ved gennemgangen af de målte parametre, er der som tidligere udvalgt kortere perioder, hvorved det er muligt at se den egentlige sammenhæng mellem parametrene. Der henvises til bilagene for de komplette dataserier.

5.2.1 Luftflow fra passivt ventilerende boringer

Sammenhørende data for atmosfæretryk og differenstryk i de to referencefiltre i boring B102 på nabogrunden fremgår af bilag 4.4. Der kan umiddelbart, og som forventet, ses en større variation i atmosfæretrykket i efterårs- og vintermånederne (oktober-marts), og denne variation afspejles tydeligt i større og mere hyppigt forekommende perioder med differenstryk. Det maksimale/minimale differenstryk observeret i sandlaget er +6,4/-8,2 mBar og i kalken +8,6/- 9,3 mBar. Det lidt større differenstryk i kalken skyldes, at der mellem sandlaget og kalken findes 1-2 meter lavpermeabelt ler, der yderligere forsinker den vertikale trykudbredelse. Til illustration af den generelle sammenhæng mellem de forskellige måleparametre er der udvalgt 2 ugers målinger fra januar 2000, jf. figur 5.8.



Figur 5.8
Sammenhæng mellem atmosfæretryk, differenstryk og luftflow i to filtre hhv. filtersat i sandlaget (SB2 Sand) og i kalken (KB2 Kalk), Nygade 37, Fakse.

Perioden omfatter passagen af fire lavtryk, hvor atmosfæretrykket under den sidste lavtrykspassage falder med en rate på op til 1,5 mBar/time over 12 timer. I referenceboringen (B102), som er forseglet mod atmosfæren og beliggende i ca. 10 m's afstand fra den nærmeste passivt ventilerende boring, genereres der under faldende atmosfæretryk et positivt differenstryk på op til 6 mBar i sandlaget og op til 8 mBar i kalken. Samtidig med at differenstrykket bliver positivt, begynder poreluft at strømme ud af de to filtre i hhv. sandet og kalken (SB-2 Sand, KB1-Kalk). Luftflowet ud af filtret i sandet når et maksimum på ca. 1,9 m³/t, mens flowet kun når op på ca. 0,8 m³/t i filtret i kalken. Det maksimale flow optræder samtidigt i sandet og kalken, hvilket skyldes, at differenstrykket i de to lag er stort set identisk.

De installerede en-vejs-ventiler blokerer effektivt for indstrømning af luft, idet der ikke kan måles noget luftflow ned i boringerne i perioder med negativt differenstryk. I de fire perioder med udstrømmende poreluft ses det karakteristiske pulserende flow-mønster fra passivt ventilerende boringer, hvor

det øjeblikkelige luftflow er proportionalt med differenstrykket. Atmosfæretrykkets årstidsvariation afspejles direkte i luftflowet registreret i de to filtre i hhv. sandlaget og kalken, jf. bilag 4.5. De hyppigste perioder med udstrømning og de største absolutte flow ses som forventet i vinterhalvåret.

Ud fra de gennemførte målerunder er den lineære sammenhæng mellem reference- differenstrykket i B102 og luftflowet fra de enkelte filtre fastlagt. Ved samtidige øjebliksmålinger af luftflowet i de enkelte filtre kan udstrømningsmønstret i de enkelte filtre tilnærmet beregnes ved skalering i forhold til den kontinuert målte variation af luftflowet i sandlaget (SB2-Sand) og kalken (KB1-Kalk). Baseret på dels de målte tidsserier i sandlaget (SB2-Sand) og kalken (KB1-Kalk), og de beregnede tidsserier af flow for de enkelte filtre, kan der udføres simpel deskriptiv statistik til beskrivelse af forskellige egenskaber for den passive luftudstrømning, jf. tabel 5.3. Filtret KB2-Kalk, hvori der også er monteret en aktiv vakuumpumpe, behandles separat i et senere afsnit.

Flow fra enkeltfiltre i sandlaget:	
Minimale årligt middel luftflow findes i SB5	0,004 m ³ /t
Maksimalt årligt middel luftflow findes i KB2-Sand	0,56 m ³ /t
Gennemsnitligt årligt middel luftflow for de 8 filtre	0,2 m ³ /t
Maksimalt øjeblikkeligt luftflow findes i KB2-Sand	14,6 m ³ /t
Statistik på kontinuert serie med luftflow i SB2-Sand:	
Antal udstrømningsperioder	399
Gennemsnitlig varighed af en enkelt udstrømningsperiode	12,7 timer
Gennemsnitlig afkastet luftvolumen pr. udstrømningsperiode	3,9 m ³
Maksimal varighed af en enkelt udstrømningsperiode	64 timer
Samlet tidsmæssig varighed af udstrømningsperioder	29%
Statistik på kontinuert serie med luftflow i KB1-Kalk:	
Antal udstrømningsperioder	386
Gennemsnitlig varighed af en enkelt udstrømningsperiode	14,3 timer
Gennemsnitlig afkastet luftvolumen pr. udstrømningsperiode	3,8 m ³
Maksimal varighed af en enkelt udstrømningsperiode	67 timer
Samlet tidsmæssig varighed af udstrømningsperioder	32%
Flow fra totalsystemet* med 9 enkelt filtre (SB1-SB6,KB1-Sand, KB2-Sand og KB2-Kalk):	
Samlet årligt middel luftflow	1,57 m ³ /t
Samlet øjeblikkeligt maksimalt luftflow	46,1 m ³ /t
* KB1-kalk med aktiv ventilation ikke medtaget	

Tabel 5.3

Simple statistiske egenskaber for variationen af luftflowet fra passivt ventilerende borer i perioden 2000-2001. Middelflow omregnet til årlige værdier, idet der kun sker udstrømning af poreluft i ca. 50% af tiden, Nygade 37, Fakse.

For filtret SB2-Sand i sandlaget har der i alt været registreret 399 udstrømningsperioder med en varighed større end 2 timer, jf. tabel 5.3. Udstrømningsperioderne har haft en gennemsnitlig varighed på 12,7 timer og et gennemsnitligt afkastet luftvolumen på 3,9 m³. Der sker en udstrømning i ca. 29% af tiden, hvilket er noget mindre end det teoretisk forventede på 50%. Dette skyldes dels, at der sker en lang række kortvarige udstrømninger af en varighed mindre end 2t, og dels at der er en vis initial modstand i systemet (en-vejs-ventiler, rørføring, GAC), som skal overvindes, førend luften begynder at strømme ud. Den samlede luft- og stofmængde, fjernet i disse kortvarige perioder, kan beregningsmæssigt vise sig at være uden betydning. For hele gruppen af filtre i sandlaget er der stor variation i boringernes gennemsnitlige årlige flow, hvilket hovedsageligt skyldes forskelle i permeabilitet. Det årlige middel-flow kan skønnes til ca. 0,2 m³/t, mens det

maksimale er $0,56 \text{ m}^3/\text{t}$. Det maksimale øjeblikkelige flow på ca. $15 \text{ m}^3/\text{t}$ optræder i KB2-Sand, hvor også det filtersatte sandlag er beskrevet som stenet - og dermed af en forventelig højere permeabilitet.

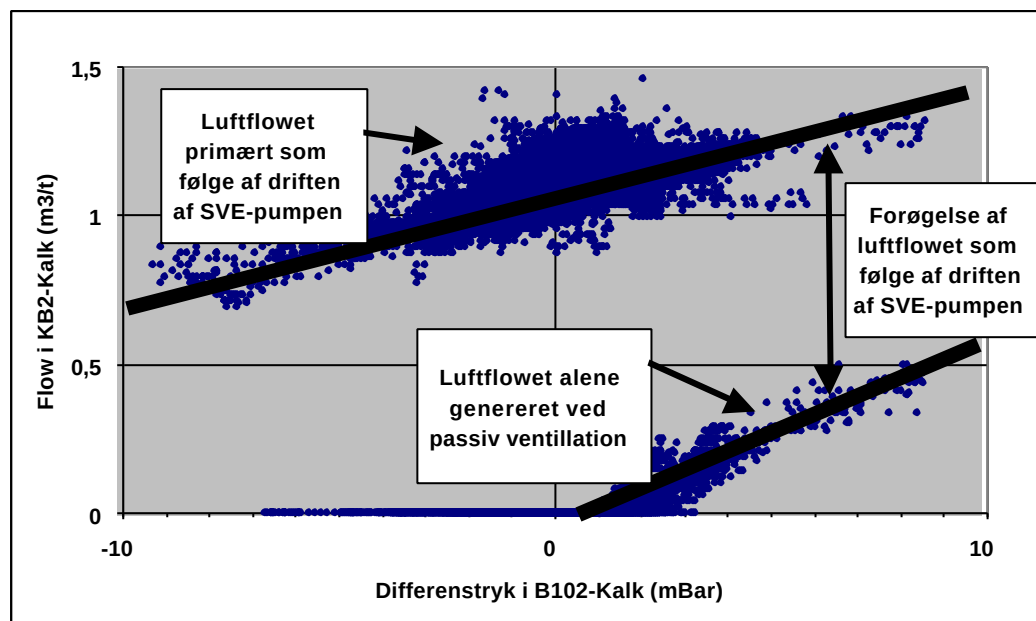
Statistikken for udstrømningsforløbet i kalken (KB1-kalk) afviger kun meget lidt fra det, der blev beskrevet for sandlaget ovenfor, jf. tabel 5.3. Dette indikerer, at permeabiliteten i de to filtre er af samme størrelse. Målinger på den anden kalkboring (KB2-Kalk) viser i øvrigt en permeabilitet sammenlignelig med KB1-Kalk. Det bemærkes, at der er målt en varighed af kontinuerede udstrømnings-perioder på op til ca. 65 timer i både sandlaget og i kalken. I forbindelse hermed er der fjernet over 25 m^3 poreluft, og herudfra kan der beregnes en maksimal afstand, hvorfra poreluften bliver trukket ind, jf. det senere afsnit om tracer-testen.

For det totale system af passivt ventilerende boringer (9 enkelt filtre) kan det gennemsnitlige årlige luftflow skønnes til ca. $1,6 \text{ m}^3/\text{t}$, jf. tabel 5.3. Det maksimale flow er i en kortvarig periode ca. $46 \text{ m}^3/\text{t}$.

5.2.2 Luftflow fra aktivt system

I boring KB2-Kalk er der installeret en mini-vakuum pumpe, der forsynes med strøm fra et batteri. Batteriet oplades alene af et solcellepanel og en vindgenerator, jf. afsnit 4.4.4. Den løbende indladning til batteriet er registreret månedligt, og resultaterne er afbildet i bilag 4.7. Den samlede indladning har i perioden 2000-2001 været ca. 144 kWh (6000 Ah), hvoraf ca. 80% kommer fra solcellerne. Der ses som forventet en meget stor variation i indladningen henover året. De mest lysfattige måneder (november-december) falder i 1. og 4. kvartal, og i disse måneder er indladningen fra solcellerne kun lidt større end fra vindgeneratoren. Samtidig er det også i disse perioder, at den største effekt fra vindgeneratoren opnås, hvilket skyldes, at vindforholdene generelt er mere gunstige i vintermånederne. Månederne med de længste dage falder i 2. og 3. kvartal, og i denne periode indlader solcellerne 8-10 gange mere effekt end vindgeneratoren.

Det vurderes, at solcellepanelet har været placeret stort set optimalt, og at den indladede effekt derfor er repræsentativ for det valgte system af solcellepanel, laderegulator og batteritype. Derimod vurderes det, at placeringen af vindgeneratoren ikke har været optimal. Faxe Bryggerierne på nabogrunden mod vest har en række store og meget høje bygninger, som vurderes at påvirke vindforholdene omkring vindgeneratoren negativt, dels i form af en læpåvirkning, men også med en øget turbulens. Det vurderes, at der under optimale forhold kunne være opnået 50-100% større effekt fra vindgeneratoren. Driften af selve systemet har kun været udsat for en enkelt fejl på laderegulatoren, mens de øvrige komponenter har fungeret efter hensigten i måleperioden.



Figur 5.9

Sammenhæng mellem luftflow i kalken (KB2 Kalk) og differenstrykket i referencefiltret i kalken på nabogrunden (B102 kalk), Nygade 37, Fakse.

På figur 5.9 er effekten af at supplere det passive flow med en aktiv pumpe illustreret med alle data fra år 2000 (ca. 35.000 datapunkter).

Luftflowet i KB2-kalk er optegnet sammen med differenstrykket i kalken målt på nabogrunden, idet dette tryk udtrykker det drivende tryk for passiv ventilation i KB2-Kalk, jf. bilag 4.5. Ved positive differenstryk og for luftflow mindre end $0,5 \text{ m}^3/\text{t}$ ses den karakteristiske lineære sammenhæng mellem drivtrykket og luft-flowet, mens der for negative differenstryk ikke ses nogen luftstrømning, idet en-vejs-ventilen er lukket. En stor gruppe målepunkter grupperer sig med flow større end ca. $0,7 \text{ m}^3/\text{t}$, og spænder over både positive og negative differenstryk. Disse målepunkter repræsenterer forholdene, når vakuumpumpen er i drift, og det gennemsnitlige flow, når pumpen kører, er ca. $1 \text{ m}^3/\text{t}$. Målepunkternes gruppering langs den indlagte trendline skyldes variationen i pumpens ydelse forårsaget af det naturligt varierende differenstryk. Således yder pumpen lidt mindre i perioder med et negativt differenstryk, idet dette tryk skal overvindes, førend pumpen kan flytte luften. Tilsvarende yder pumpen lidt mere, når der er et naturligt positivt differenstryk, dvs. et svagt overtryk i kalken i forhold til atmosfæren.

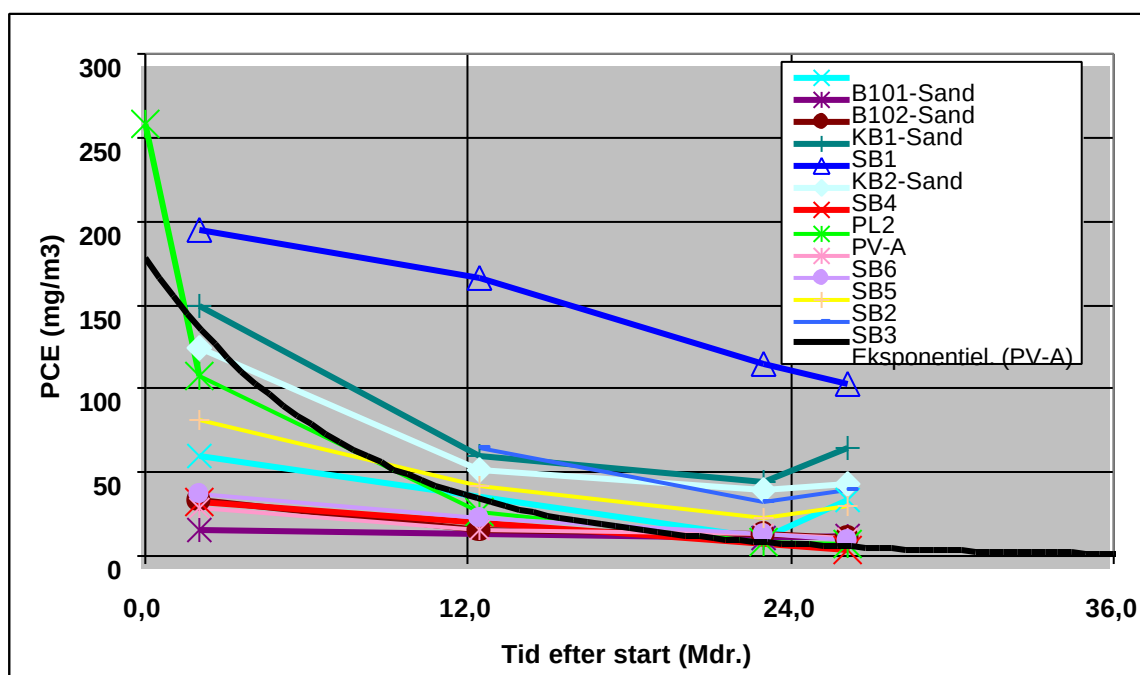
Af figuren kan det konkluderes, at den indskudte vakuumpumpe kan forøge luftflowet med ca. $0,7\text{-}1 \text{ m}^3/\text{t}$ i de perioder, der er nok effekt på batteriet. Det gennemsnitlige årlige flow er ca. $0,6 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket er af samme størrelsesorden som det gennemsnitlige passive flow fra de bedst ydende filtre i sandlaget (SB2-Sand), jf. tabel 5.3. Ved simpel statistik på måledata findes det, at vakkumpumpen kører ca. 55% af tiden, mens det passive luftflow (flow-perioder >2 timers varighed) kun findes i ca. 30% af tiden. Tilsvarende findes det, at vakuumpumpen leverer 98% af den totale årlige luftmængde, mens kun 2% kommer fra passivt flow. Dette forhold mellem aktivt og passivt flow skyldes primært, at kalkens permeabilitet er lav. Havde den tilsvarende pumpe været monteret i sandlaget i det højstydende filter (SB2-Sand) i samme boring, vurderes det, at forholdet mellem aktivt-passivt flow havde været af samme størrelse. Såfremt systemet blev udbygget med endnu et solcelle-panel

(50W) og ydelsen fra vindgeneratoren kunne forbedres ved en ændret placering, kunne driftsperioden sandsynligvis øges til 90% af tiden.

5.2.3 Poreluftkoncentrationer

For at følge udviklingen i poreluftens koncentration af PCE i måleperioden er der gennemført en række målinger i de 10 passivt ventilerende filtre samt i fem filtre i afblændede monitoringsboringer, placeret dels på nabogrunden (B101 og B102, begge med et filter i både kalken og sandlaget) samt dels i filter PV-A i sandlaget på selve grunden, jf. bilag 4.1. Der er udført i alt 4 monitoringsrunder, hvor koncentrationerne af den udstrømmende luft er målt over 5-15 min., svarende til i alt 5-15 enkeltmålinger. Herudover er der i filteret KB1-kalk og SB2-sand udført 2 kontinuerte måleserier med 15 min.'s intervaller af 1-3 ugers varighed. Formålet hermed har været at få indsigt i variationen af koncentrationen over flere efterfølgende udstrømningsperioder, og i forbindelse hermed at udføre et tracerforsøg til yderligere belysning af strømningsmønstret omkring en passivt ventilerende boring. Samtlige måldata er afbildet i tabelform og som kurver i bilag 4.7.

Resultaterne af de 4 målerunder på filtrene placeret i sandlaget er afbildet lineært på figur 5.10, mens de i bilag 4.7 også er afbildet logaritmisk og sammen med data for kalken.



Figur 5.10

Tidslig variation i den udstrømmende porelufts indhold af PCE. Samtlige filtre i sandlaget i perioden 2000-2002 (0-26 mdr.), Nygade 37, Fakse.

Der kan i perioden som helhed påvises en eksponentielt aftagende koncentration af PCE i alle filtre. Desværre lå den første målerunde (februar 2000) først efter ca. 2 måneders drift, og kun i den tidligere testboring til passiv ventilation (PV-A), og i de to filtre på nabogrunden (B101-Sand og B102-Sand) eksisterer der data fra før opstarten. Betragtes filter PV-A, der kun er et monitoringsfilter, og det passivt ventilerende filter SB1, som ligger ca. 5 m fra filter PV-A, viser de et meget ensartet forløb i hele måleperioden,

jf. figur 5.10. Da koncentrationen i PV-A er reduceret fra ca. 260 til 110 i løbet af de første måneders drift, vurderes det, at startkoncentrationen i SB1 har været mindst 250 mg PCE/m³. Tilsvarende vurderes en række af de andre filtre at have haft op til 50% højere startkoncentrationer end målt ved første målerunde i februar 2000. De to filtre i sandlaget på nabogrunden (B101,B102) havde under en månedlang ventilationstest i 1997 vist konstant stigende værdier på op til 120-150 mg PCE/m³, og det vurderes, at poreluftforureningen er blevet trukket i denne retning. Dette niveau er væsentligt nedbragt i februar 2000, men der har været en mellemliggende periode på 2-3 år, hvor naturlig diffusion også har reduceret koncentrationen i området, og det er derfor ikke sikkert, at det alene er driften af den passive ventilation, der har bragt koncentrationerne i de to filtre ned på ca. 15-60 mg PCE i februar 2000.

I løbet af de første 26 mdr. er koncentrationen af PCE generelt reduceret til under 100 mg/m³ i alle filtre, og i hovedparten til under 40 mg/m³. Specielt efter ca. 23 mdr. og igen efter 26 mdr., svarende til perioden nov. 2001 til feb. 2002, observeres der dog en tydelig stigning i to filtre. Stigningen kan skyldes en større nettonedsivning gennem dæklaget i denne periode, som følge af den rekordstore nedbør. Antages at det generelle eksponentielle fald i koncentrationer fortsætter i de kommende år, er der på figur 5.10 vist den forventede udvikling for filter PV-A. For dette filter kan der efter 36 mdr. forventes et koncentrationsniveau på ca. 10 mg/m³. Tilsvarende for de øvrige filtre kan der efter 36 mdr. forventes koncentrationsniveauer på 20-50 mg/m³. Det kraftigst forurenede område er påvist, hvor KB2-Sand er beliggende, og i dette filter aftager koncentrationen også langsommere i forhold til de øvrige filtre. Den aftagende koncentration indikerer dog, at massejernelsen via det passive flow fra boringen er tilstrækkeligt til at overkomme den nedbørsbetingede udvaskning, der sker fra den overliggende moræner. I dette filter vil der således gå mindst 48 mdr., førend koncentrationsniveauet er nedbragt til ca. 20-50 mg/m³.

Den procentvise reduktionen i poreluftens indhold af PCE for de enkelte passivt ventilerende filtre i sandlaget er opgjort i tabel 5.4. Reduktionen varierer fra ca. 40% til 70%, men har nok reelt været noget større, idet den anførte startkoncentration, jf. tidligere diskussion, først er målt efter 2 mdr.

Dato	01-02 2000	05-02 2002	Reduktion
Måneder fra start	2	23	(%)
KB1-Sand	34	11	67,1
KB2-Sand	195	103	47,2
SB1	150	65	56,7
SB2	81	30	62,6
SB3	100	¹⁾ 40	38,5
SB4	124	43	65,7
SB5	37	10	72,7
SB6	29	11	63,8
B101-Sand ²⁾	60	33	45,0
B102-Sand ²⁾	15	12	23,3
PV-A ³⁾	107	7	97,4
Middel	83	33	58,2

¹⁾ Skønnet værdi ud fra figur 5.10.

²⁾ Monitoringsboringer på nabogrunden ³⁾ Monitoringsboring på selve grunden

Tabel 5.4

Absolut reduktion i poreluftens indhold af PCE (mg/m³) i perioden 2000-2002 for de passivt ventilerende boringer i sandlaget, Nygade 37, Fakse.

Medtages også filtrene i de 3 monitoringsboringer, fås i gennemsnit en reduktion af koncentrationen på ca. 58%, svarende til at gennemsnitskoncentrationen er reduceret fra 83 til 33 mg/m³.

Den procentvise reduktion i poreluftens indhold af PCE for de enkelte passivt ventilerende filtre i kalken er opgjort i tabel 5.5. I kalken er datamaterialet relativt spinkelt, idet der kun er to passivt ventilerende filtre i hhv. boring KB1 og KB2, heraf er KB2-Kalk endvidere udstyret med en mini-vakuumpumpe. For de to passivt ventilerende boringer i kalken ses en eksponentiel reduktion på ca. 45%, mens der ses en reduktion af samme størrelse i de to monitoringsfiltre på nabogrunden. Den absolutte reduktion i koncentrationen er under 10 mg/m³, og det er vanskeligt ud fra de tilgængelige data at vurdere, hvor langt ned koncentrationerne kan reduceres over en længere periode.

Dato	01-02 2000	05-02 2002	Reduktion
Måneder fra start	2	23	(%)
KB1-Kalk	22	12	45,9
KB2-Kalk ¹⁾	29	16	43,8
B101-Kalk ²⁾	19	9	45,0
B102-Kalk ²⁾	16	12	54,2
Middel	22	12	47,2

¹⁾ Boringen yderligere monteret med mini vakuumpumpe ²⁾ Monitoringsboring på nabogrunden og værdier fra SVE-forsøg i 1997.

Tabel 5.5

Absolut reduktion i poreluftens indhold af PCE (mg/m³) i perioden 2000-2000 for de passivt ventilerende boringer i kalken, Nygade 37, Fakse.

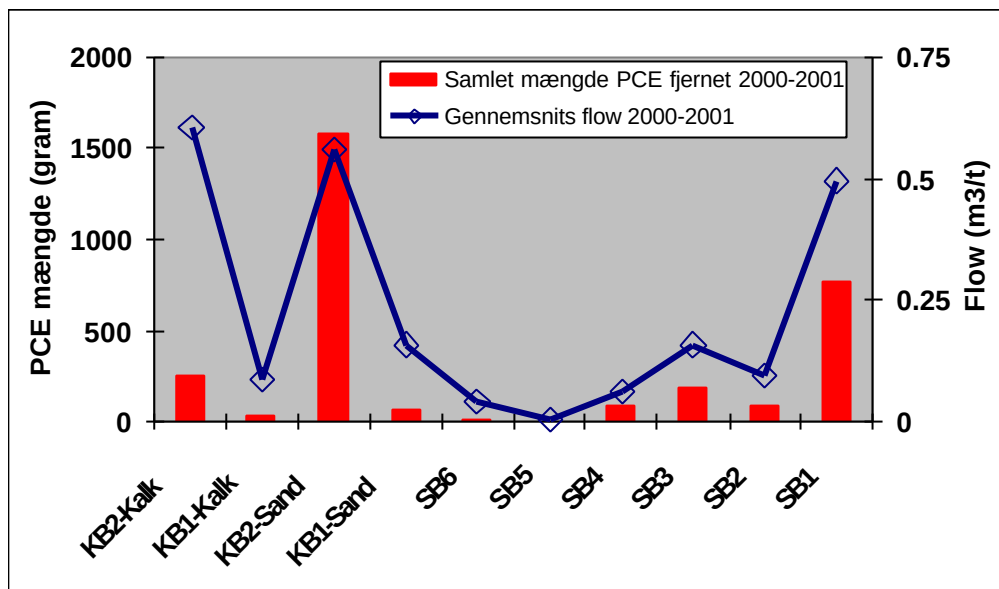
Effekten af den passive ventilation på den horisontale udbredelse af PCE i sandlaget for perioden februar 2000 til februar 2002 er afbildet i bilag 4.8. Området med koncentrationer over 100 mg/m³ er reduceret væsentligt, og findes nu kun i et lille område omkring KB2. Tilsvarende er området med mere end 25 mg/m³ blevet reduceret fra at have omfattet hele grunden, til nu kun ca. en tredjedel. Det vurderes, at 10 mg/m³ konturlinien er trukket ca. 10 m ind mod de passivt ventilerende boringer på grundens vestlige del, og at den nu findes langs det vestlige skel. Langs grundens østlige skel og på nabogrunden er specielt 100 mg/m³ linien, mens også 25 mg/m³ konturlinien trukket ind mod de passivt ventilerende boringer. Denne tilbagetrækning på ca. 2-5 m/år er nettoeffekten af to modsatrettede mekanismer, hhv. molekylær diffusion væk fra kildeområdet og advektiv gastransport ind mod de passivt ventilerende boringer.

Der er således tydelige indikationer på, at de passivt ventilerende boringer over tid er i stand til at forhindre en videre horisontal spredning – og sandsynligvis reducere den yderligere. Med udgangspunkt i diskussionen af figur 5.10, vurderes det sandsynligt, at der indenfor en kortere årrække kun vil være koncentrationer større end 10-20 mg/m³ i sandlaget direkte under selve grunden.

5.2.4 Massefjernelsesrate

Massefjernelsesraten fra en passivt ventilerende boring er en funktion af både luftflow og koncentration. På baggrund af de beregnede tidsserier for de enkelte filtre, jf. afsnit 5.2.1, og de eksponentielt aftagende koncentrationer, vist på figur 5.10, er der med tidsskridt på 15 min. beregnet en gennemsnits-

fjernelsesrate for dette tidsskridt. Akkumuleres denne serie, fås den samlede masse, der er fjernet fra filtret. Ved at akkumulere bidraget for samtlige filtre fås det samlede systems karakteristik, jf. bilag 4.9. Som det fremgår af bilaget, er der fra systemet af de passivt ventilerende filtre i sandlaget fjernet ca. 2,7 kg PCE. Fra de to filtre i kalken er der i alt fjernet ca. 0,28 kg, og den samlede massefjernelse fra grunden er således ca. 3 kg i løbet af de første 2 års drift. Betydningen af både luftflow og koncentration for den enkelte borings samlede massefjernelse er illustreret på figur 5.11.



Figur 5.11

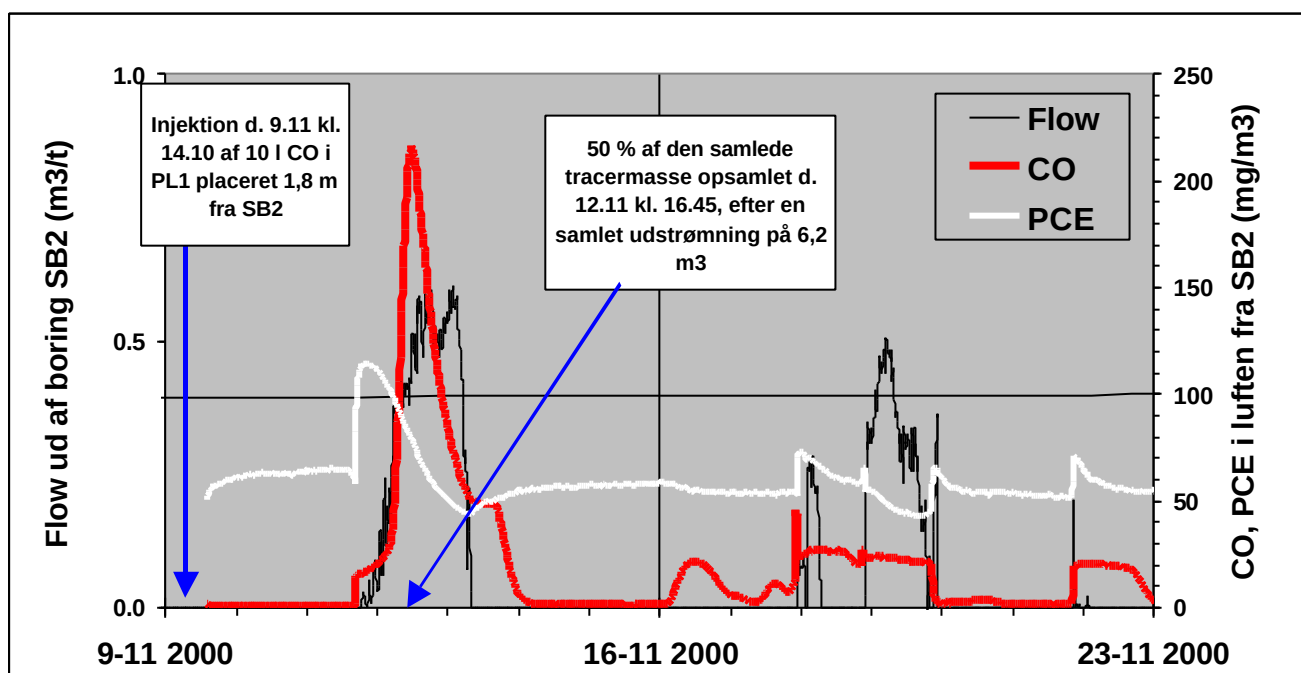
Fordeling af den samlede massefjernelse og det gennemsnitlige luftflow mellem de enkelte filtre. Samtlige filtre i perioden 2000-2002, Nygade 37, Fakse.

For de to kalkboringer sker 90% af massefjernelsen primært fra KB2-Kalk, hvor dels den lille vakuumpumpe øger flowet fra boringen markant og hvor koncentrationen i KB2-Kalk er højest. For filtrene i sandlaget sker ca. 85% af massefjernelsen fra to filtre (KB2-Sand og SB1), og begge filtre har initialt en årlig fjernelsesrate på ca. 0,5 kg PCE/år. Dette skyldes, at disse to filtre samtidig har både de højeste udgangskoncentrationer og de største luftflow. Med det forventede fortsatte koncentrationsfald i filtrene i sandlaget, vurderes det, at den årlige fjernelsesrate fra sandlaget vil aftage fra ca. 1,7 kg PCE/år i det første driftsår til under 0,1 kg/år i løbet af de næste par år.

5.2.5 Tracerforsøg

For at beskrive det luftstrømningsmønster, som skabes omkring en passivt ventilerende boring i sandlaget, er der gennemført et tracerforsøg på filter SB2-Sand. Forsøget er initieret d. 9/11 2000 ved at injicere 10 l CO gas ved en rate på 1 l/min. i monteringspunkt PL1, der er et ca. 0,5 m langt ø5 mm filter. Afstanden mellem SB2-Sand og PL1 er ca. 1,8 m. Herefter er filtret i PL1 afblændet for at undgå, at boringen påvirker transporten af traceren i den umættede zone. Alle øvrige passivt ventilerende boringer har været i drift under forsøget, og ligger i en afstand af 6-15 m fra SB2-Sand, jf. bilag 4.1. I perioden 9/11-23/11 2000 er der hver 15 min. målt indhold af PCE og CO i afkastluften fra filter SB2-Sand, og samtlige forsøgsdata er afbildet i bilag 4.10.

De målte koncentrationer af PCE og CO under det 2 uger lange forsøg er afbildet på figur 5.12. Allerede få timer efter den første udstrømningsperiode er startet, observeres et stigende CO-indhold, og koncentrationen af traceren når sin maksimale værdi ca. 20 timer inde i den første udstrømningsperiode. Herefter observeres et meget tydeligt aftagende forløb over de næste 20 timer, indtil det naturlige luftflow ud af boringen ophører. I samme periode ses en lignende tendens for PCE, men koncentrationen når til forskel fra CO sit maksimum allerede efter 1 times udstrømning, og aftager herefter jævnt. Efter denne første meget lange udstrømningsperiode følger 5 dage uden udstrømning, hvorefter der ses et par udstrømningsperioder, hvor hverken PCE- eller CO-koncentrationen når op på deres maksimale niveauer. Fronten og en væsentlig del af halen af den injicerede "tracer-sky" vurderes at være indfanget af boringen allerede under den første udstrømningsperiode. En total massebalance for CO viser dog, at der kun er opsamlet 15% af den injicerede mængde i hele den 2 uger lange periode. Årsagen til at der ikke opnås en 100% opsamling er – udover at forsøget skulle have kørt lidt længere tid, at tracergassen fortyndes naturligt ved diffusion i alle retninger, og at der samtidig sker strømning i retning af de omkringliggende passivt ventilerende boringer. Endvidere kan der ske en vis vertikal spredning og dermed yderligere fortynding.



Figur 5.12
Tracerforsøg på filter i SB2-Sand. Tidslig udvikling i PCE- og CO-koncentration samt flow under forsøget i perioden 9/11-23/11 2000, Nygade 37, Fakse.

Fra injektionstidspunktet og til starten af gennembruddet er der passivt ventileret få liter luft fra SB2-Sand. Forklaringen herpå og den lave genfindning af CO er sandsynligvis dels, at selve injektionen af CO i PL1 har presset gassen i retning af SB2, og dels at der sker en naturlig diffusiv spredning i de 2 døgn, der går, førend første udstrømningsperiode starter.

I forhold til den samlede CO-mængde, der er afkastet i den to uger lange forsøgsperiode, er 50% opsamlet ca. 23 timer inde i første udstrømningsperiode, dvs. ca. 3 timer efter den maksimale CO-koncentration er registreret. I forbindelse hermed er der udstrømmet ca. 6,2 m³ poreluft, jf. figur 5.12. Som for tracertesten i Askov er dette et udtryk for den horisontale

middelhastighed, og med denne luftmængde kan der under følgende simple antagelser beregnes en middelfasthed fra SB2-Sand, hvorfra luften kan være trukket. Antages at den horisontale lufthastighed i niveauet for filtret er horisontal og jævn over hele den filtersatte dybde i SB2-Sand på 3 m og radiært og ensartet ind mod filtret fra alle retninger, samt at den effektive luftporøsitet er ca. 0,32, kan den gennemsnitlige afstand beregnes til ca. 1 m. Denne afstand er lidt over halvdelen af den faktiske afstand på 1,8 m, og denne tendens er observeret i flere andre lignede tracerforsøg. At gennembruddet sker tidligere end forventet ud fra den simple beregning, skyldes, udover de førnævnte forhold omkring injektion og diffusion, at antagelsen om en homogen hastighedsfordeling ikke er korrekt. Der vil dels på poreskala-niveau være en andel af de større porer, som er luftfyldte og sammenhængende, og hvorigennem den advektive transport sker relativt hurtigt, mens der i en del af de mindre porehulrum vil findes delvis afsnørede luftfyldte porer, hvor luften kun langsomt kan strømme igennem. Der er sandsynligvis også en vis vertikal variation i permeabiliteten, hvilket giver en uens lufthastighed over dybden.

5.2.6 Samlet massebalance

Under de første 2 års drift er der ca. fjernet 2,7 kg PCE fra sandlaget og ca. 0,3 kg PCE fra kalken. Antages det, at denne mængde PCE er tilført den umættede zone over en ca. 30-års periode (forureningsstart ca. 1970), svarer det til en kildestyrke på ca. 0,1 kg/år. Kilde-styrken kan også vurderes ud fra den forventede årlige fjernelsesrate fra sandlaget efter længere tids drift (2-4 års drift) på under ca. 0,1 kg, jf. afsnit 5.2.4. Endelig er den årlige udvaskning gennem dæklaget tidligere bestemt til under 0,25 kg PCE/år, jf. afsnit 4.4.3.

Den samlede mængde chlorerede opløsningsmidler, der er adsorberet på det centrale kulfilter, kan vurderes ud fra kemiske analyser på blandingsprøver af kulmaterialet. Ved to lejligheder er der i forbindelse med udskiftning af filtret udtaget prøver, og i begge tilfælde kunne der konstateres gennembrud på kulfilteret, jf. tabel 5.6.

	Kulskift august 2001			Kulskift juni 2002		
	Koncentration (mg/kg-GAC TS)	Mætning af kul (% af kulvægt)	Samlet stofmængde i GAC-enheden (g)	Koncentration (mg/kg-GAC)	Mætning af kul (% af kulvægt)	Samlet stofmængde i GAC-enheden (g)
Chloroform	0,4		0,05	0,56		0,08
1,1,1 TCA	0,32		0,04	0,58		0,08
TCE	390		5,3	1.100		14,9
PCE	19.000		257	18.000		243
cis-1,2-DCE	150		2	430		5,8
Sum	19.541	2	304	19.531	1,9	264

Tabel 5.6
Tilbageholdelse af enkeltstoffer på GAC-enheder efter gennembrud er observeret, Nygade 37, Fakse.

Hovedkomponenten, som påvises og tilbageholdes i GAC-enheden, er som forventet PCE, og ved begge kulskift udgør PCE-andelen 92-97% af totalindholdet af chlorerede opløsningsmidler. Nedbrydningsprodukter udgør således en mindre del i forhold til totalindholdet, men tilbageholdes også. Den samlede masse af chlorerede opløsningsmidler, som er opsamlet ved begge kulskift, er i størrelsesordenen 0,3 kg, hvilket svarer til en mætning af kullene på ca. 2 % (vægt). Dette er noget mindre end den forventede kapacitet på ca. 1-2

kg og en mætning af kullene på op til 20% (vægt), jf. afsnit 3.2. Årsagen til den lavere kapacitet er sandsynligvis den høje fugtighed i luftstrømmen og evt. kondensation af vanddamp på oversiden af kullene.

Ved de to kulsift er der samlet fjernet ca. 0,6 kg PCE, og der er herudover foretaget endnu et kulsift efter gennembrud. Der er således samlet opsamlet ca. 1 kg PCE på GAC-enheder, mens de resterende 2 kg, som er fjernet, er afkastet til det fri igennem kulfiltre med gennembrud – primært i det første 1 år af driften, hvor de højeste koncentrationer blev målt. Med den nuværende fjernelsesrate på ca. 0,1 kg/år vurderes det fremover tilstrækkeligt at udskifte kulfiltret 1 gang om året.

Udover PCE er der også påvist nedbrydningsprodukterne af TCE og Cis-1,2-Dichlorethylen i poreluften. Generelt udgør andelen af nedbrydningsprodukter mellem 1 og 25%, men for de filtre, hvorfra hovedparten af massen fjernes, udgør mængden af nedbrydningsprodukter kun ca. 5%, svarende til at der er fjernet ca. 0,15 kg nedbrydningsprodukter - udover de ca. 3 kg PCE. Denne fordeling mellem PCE og dets nedbrydningsprodukter er i god overensstemmelse med fordelingen på kul fra de udskiftede GAC-enheder.

Der må forventes en vis variation i kildestyrken fra år til år, men ud fra det samlede datasæt vurderes det, at den årlige kildestyrke til den umættede zone er ca. 0,1 kg PCE.

5.3 Prins Valdemars Alle 14, Allerød

Måleresultaterne for hele den 2-årige monitoringsperiode er optegnet og vedlagt i bilag 2.2-2.11. På grund af bl.a. en vandfyldt målebrønd i april 2000 og en periodisk defekt lufthastighedsmåler samt andre småfejl, foreligger der ikke en fuldstændig kontinuert måleserie for alle parametre. Det har dog, ud fra det målte barometertryk på den nærliggende lokalitet på Amtsvej, været muligt at beregne værdier for både differenstryk og passivt flow i de perioder, hvor dataloggeren eller selve flowmåleren har været ude af drift. Disse syntetiske data er herefter sat sammen med de egentlige måledata til en fuldstændig serie, som vist i bilag 2.3 og 2.4. Beregningsproceduren er nærmere gennemgået i afsnit 2.3, med data fra denne lokalitet som eksempel.

Ved gennemgangen af de målte parametre er der, for at kunne se vigtige sammenhænge, ofte kun vist data for få dage, og der henvises til bilagene for de komplette dataserier.

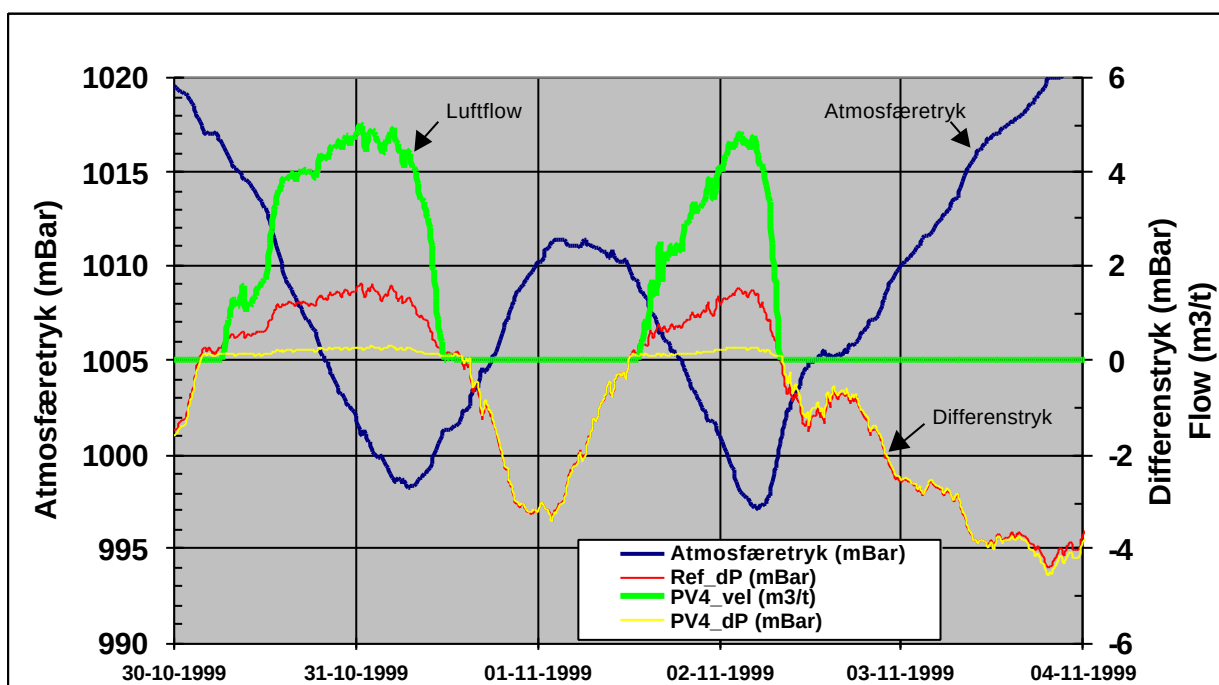
5.3.1 Luftflow

På grund af det ca. 10 m mægtige lavpermeable dæklag af moræneler findes der stort set altid et differenstryk mellem atmosfæren og den umættede zone. Sammenhørende data for atmosfæretryk og differenstryk fremgår af bilag 2.3. Der kan umiddelbart, og som forventet, ses en større variation i atmosfæretrykket i efterårs- og vintermånedene (oktober-marts), og denne variation afspejles tydeligt i større og mere hyppigt forekommende perioder med differenstryk. Det maksimale differenstryk observeret er +11 mBar og det minimale er -11 mBar.

Til illustration af den generelle sammenhæng mellem de forskellige måleparametre er der udvalgt 5 dages målinger fra november 1999, udført i forbindelse med indkøringen og testen af datalogger-systemet, jf. figur 5.13.

Perioden omfatter passagen af to lavtryk, hvorunder atmosfæretrykket falder med en rate på op til 0,8 mBar/time over 12-24 timer. Som følge heraf genereres der under faldende atmosfæretryk et positivt differenstryk på op til 1,5 mBar i referenceboringen B24-1(Ref_dP), som er forseglet mod atmosfæren og beliggende i ca. 6 m's afstand fra PV3, der er den nærmeste passivt ventilerende boring. Samtidig med at differenstrykket bliver positivt, begynder poreluft at strømme ud af måleboringens filter (PV4_vel). Luftflowet når et maksimum på ca. 5 m³/t, men tidspunktet herfor er ikke sammenfaldende med tidspunktet for atmosfæretrykkets minima. Det maksimale luftflow optræder ca. 1-2 timer før atmosfæretrykkets minima, svarende til det tidspunkt, hvor hældningen på kurven for atmosfære-trykket begynder at aftage. Årsagen til denne forskel er, at raten, hvormed atmosfæretrykket aftager (mBar/time), bliver mindre mod slutningen af lavtrykspassagen, og at trykudligningen gennem dæklaget til atmosfæren derfor reducerer den fortsatte opbygning af differenstrykket.

Det vurderes i øvrigt, at differenstrykket i referencefiltret er påvirket af en horisontal trykudligning igennem sandlaget, når en-vejs-ventilen er åben og der er atmosfærisk tryk i de passivt ventilerende boringer. Dette ses tydeligt i perioden fra d. 31.-10. og til d. 2.-11., hvor atmosfæretrykket numerisk set udviser en ensartet ændring pr. time for både den stigende og aftagende del af forløbet, mens det tilhørende differenstryk kun viser værdier op til 1,5 mBar, men samtidig negative værdier på lidt mindre end -3 mBar. Det målte referencetryk er således kun helt korrekt for perioder med stigende atmosfæretryk.



Figur 5.13
Observationer af atmosfæretryk, differenstryk og luftflow over 5 dage i oktober-november 1999.

De installerede en-vejs-ventiler fungerer efter hensigten, idet der ikke kan måles noget luftflow ned i boringerne i perioder med negativt differenstryk. Et eksempel på en en-vejs-ventil efter ca. 1 års drift fremgår af figur 5.14. Til trods for rusten på ydersiden, fungerer selve ventilen tilfredsstillende.



Figur 5.14

En-vejs-ventil efter 1 års drift. Nede i ventilen ses den lille kontraklap i klart plast. Se i øvrigt bilag 1 for detaljer.

I overensstemmelse hermed viser referenceboringen B24-1 (Ref_dP) og filtret i den passivt ventilerende boring (PV4_dP) i målebrønden identiske differenstryk i disse perioder, idet begge filtre er afspærret mod atmosfæren. I de to perioder med udstrømmende poreluft ses, at der i selve filtret (PV4_dP) er et svagt overtryk på op til ca. 0,3 mBar, mens der i referencefiltrene er op til ca. 1,5 mBar. Generelt indikerer de fulde måleserier, at det samlede tryktab under luftens passage igennem først selve en-vejs-ventilen og herefter brønden (se figur 3.1) er op til maksimalt ca. 0,5 mBar for de største flow på op til 10-15 m³/t. Afhængig af det aktuelle luftflow, svarer dette tryktab til under ca. 5 % af det drivtryk, der er til rådighed.

På denne lokalitet er temperaturen registreret ca. midt i selve brønden for PV4, og i perioder på oversiden af metalnettet på kulfiltret, jf. bilag 2.5. Temperaturen udviser en meget tydelig årstidsvariation, med de højeste temperaturer på op til ca. 24°C målt i juli 2001 og de laveste temperaturer på ca. 2°C i begyndelsen af januar måned 2001. Den udstrømmende poreluft forventes at have en relativt konstant temperatur på ca. 8°C, og i brønden vil der kun være <8°C i de koldeste vintermåneder. I denne korte periode vil der kunne ske en kondensation af vanddamp på selve kulmaterialet, idet dette er koldere og har en lavere dugpunktstemperatur end den udstrømmende vandmættede poreluft. Det væsentligste problem med kulfiltrene, har været korrosion af det udvendige metalnet. Enkelte GAC-enheder har været specielt medtaget på grund af dels en meget høj PCE-koncentration (>500 mg/m³) i poreluften og dels på grund af vand kondenseret på undersiden af metaldækslet i selve brønden, og herefter er dryppet ned ovenpå GAC-enheden og løbet videre ned på ydersiden af selve metalnettet. For at undgå dette problem ved fremtidige projekter kan kulfiltrene skiftes, inden gennembrud, og der kan monteres en simpel vandnæse, der kan lede det kondenserede vand ned langs brøndens indervæg.

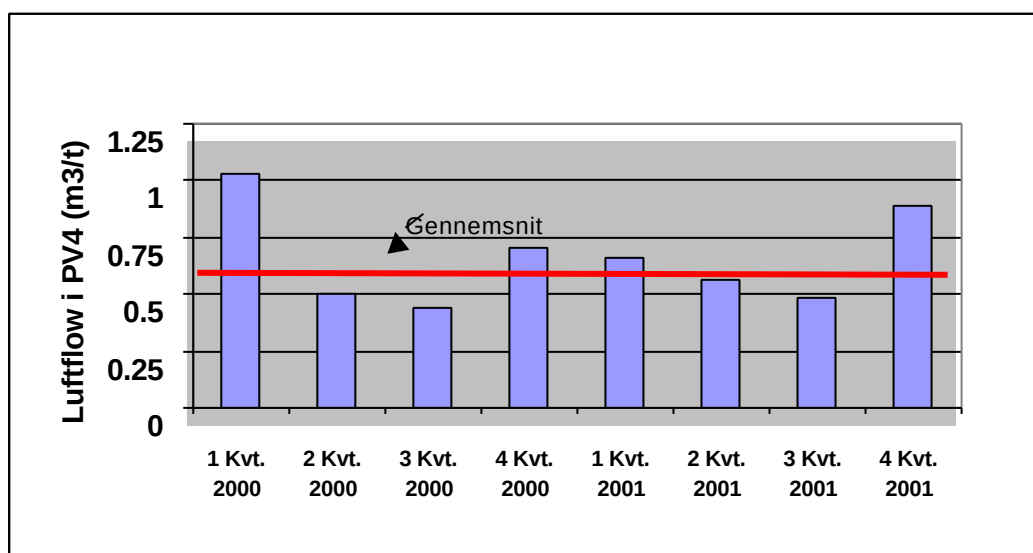
Som for de øvrige lokaliteter afspejles årstidsvariation i atmosfæretrykket direkte i luftflowet, registreret i boring PV4, i målebrønden, jf. bilag 2.4. De hyppigste perioder med udstrømning og de største absolutte flow ses igen som forventet i vinterhalvåret. Dette flowmønster observeres i samtlige filtre, og udfra samtidige øjebliksmålinger af luftflowet i samtlige 5 filtre (PV1-PV5) kan udstrømnings-mønstret i de enkelte filtre tilnærmet beregnes ved skalering i forhold til den kontinuert målte variation af luftflowet i PV4. Baseret på disse tidsserier, kan der udføres simpel deskriptiv statistik til beskrivelse af forskellige egenskaber for den passive luftudstrømning, jf. tabel 5.7 og bilag 2.6.

Flow fra enkeltfiltre:	
Minimalt årligt middel luftflow findes i PV1	0,28 m ³ /t
Maksimalt årligt middel luftflow findes i PV4	0,66 m ³ /t
Gennemsnitligt årligt middel luftflow for de 5 filtre i PV1-PV5	0,42 m ³ /t
Maksimalt øjeblikkeligt luftflow findes i PV4	10,6 m ³ /t
Statistik på serie med luftflow i PV4:	
Antal udstrømningsperioder	333
Gennemsnitlig varighed af en enkelt udstrømningsperiode	25 timer
Gennemsnitlig afkastet luftvolumen pr. udstrømningsperiode	35 m ³
Samlet tidsmæssig varighed af udstrømningsperioder	47 %
Flow fra totalsystemet med i alt 5 enkelt filtre i PV1-PV5:	
Samlet årligt middel luftflow	2,1 m ³ /t
Samlet øjeblikkeligt maksimalt luftflow	33,5 m ³ /t

Tabel 5.7

Simple statistiske egenskaber for variationen af luftflowet i perioden 2000-2001. Middelflow omregnet til årlige værdier, idet der kun sker udstrømning af poreluft i ca. 47% af tiden.

Som det fremgår af tabel 5.7, er det gennemsnitlige årlige luftflow fra et enkelt filter ca. 0,42 m³/t, og variationen mellem filtrene er ikke markant, og indikerer en ret ensartet effektiv permeabilitet på tværs af grunden. Kortvarigt har der været et luftflow på over 10 m³/t fra et enkelt filter. For kvantitativt at belyse luftflowets variation henover året, er det gennemsnitlige flow i hvert kvartal opgjort for PV4 og afbildet på figur 5.15.



Figur 5.15

Kvartalsvis variation i luftflowet ud af filtret PV4 i perioden 2000-2001, Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

Der kan indenfor den relativt korte måleperiode på 2 år ses markante forskelle på det samlede flow i de enkelte kvartaler. De største flow forekommer i 1. og

4. kvartal i både 2000 og 2001, mens de mindste flow optræder i 2. hhv. 3. kvartal. Det gennemsnitlige flow i de enkelte kvartaler varierer således ca. 50% i forhold til det samlede årsgennemsnit. Analyser af en længere dataserie for atmosfæretrykket (1990-2000) bekræfter, at der kan forventes større flow i efterår/vinter sammenlignet med forår/sommer.

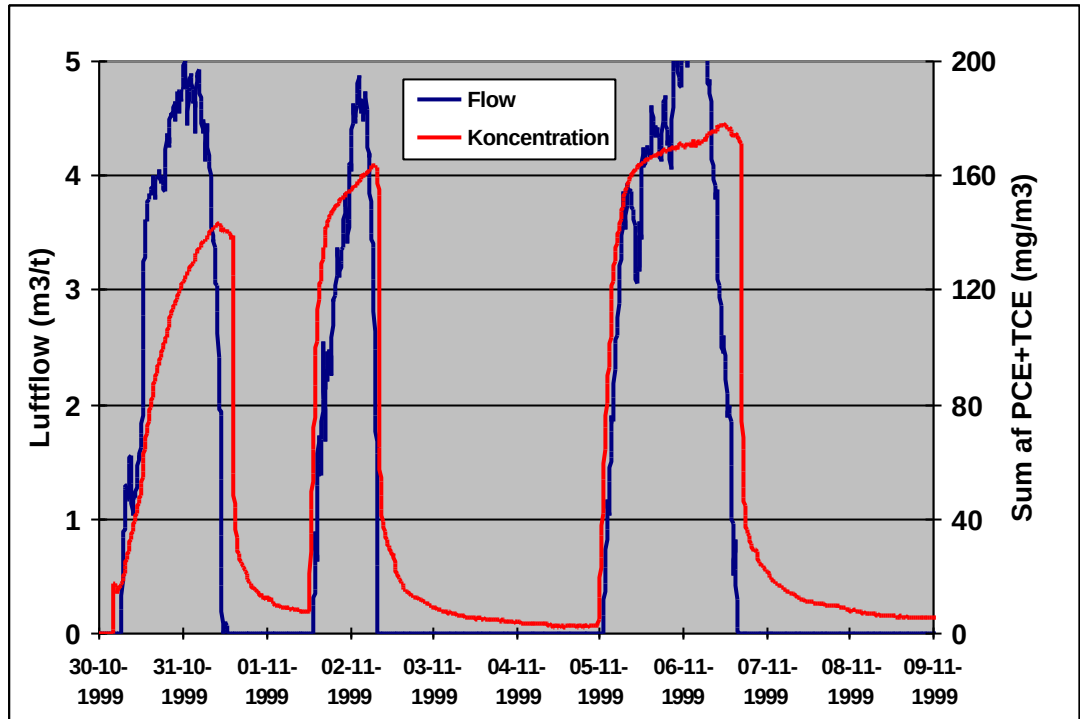
Der har i alt været registreret 333 udstrømningsperioder med en varighed større end 2 timer, jf. tabel 5.7. Udstrømningsperioderne har haft en gennemsnitlig varighed på 25 timer, med et gennemsnitligt afkastet luftvolumen på 35 m^3 . Variationsbredden for det gennemsnitlige flow fra de enkelte filtre er fra 0,28 til $0,66 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket indikerer en ret ensartet effektiv permeabilitet på tværs af grunden. Under ekstremt hurtige fald i atmosfæretrykket er der kortvarigt målt flow op til $10,6 \text{ m}^3/\text{t}$.

For det totale system (5 enkeltfiltre) kan det gennemsnitlige årlige luftflow skønnes til ca. $2,1 \text{ m}^3/\text{t}$, jf. tabel 5.7. Det maksimale flow er i en kortvarig periode ca. $33,5 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket svarer til et gennemsnitligt luftflow for hver af de seks boringer på ca. $7 \text{ m}^3/\text{t}$.

5.3.2 Poreluftkoncentrationer

For at følge udviklingen i poreluftens koncentration af PCE i måleperioden er der gennemført en række målinger i de 5 passivt ventilerende filtre, jf. bilag 2.7. Der er udført i alt 5 monitoringsrunder, hvor koncentrationerne af den udstrømmende luft er målt over ca. 15 min. Herudover er der i målebrønden i PV4 udført 3 kontinuerte måleserier med 15 min.'s intervaller af 1-2 ugers varighed, med det formål at få indsigt i variationen af koncentrationen over flere efterfølgende udstrømnings-perioder i løbet af den 2-årige måleperiode. Samtlige måledata er afbildet i bilag 2.7.

Til illustration af et typisk driftsforløb, er der på figur 5.16 afbildet luftflow og koncentrationen af PCE+TCE i den udstrømmende poreluft for en 10 dages periode under indkøringen af systemet i december 1999.



Figur 5.16

Variation i luftflow og PCE-koncentration fra filtret PV4 over en periode på 10 dage i november 1999, Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

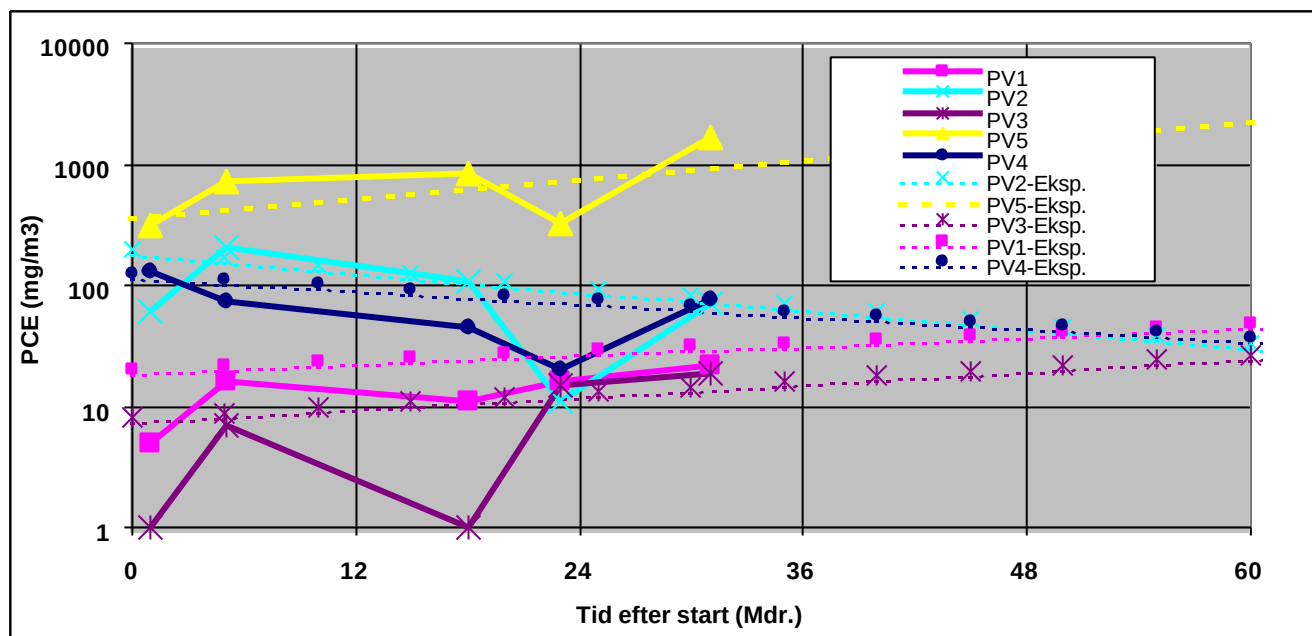
Der ses i alt 3 separate perioder med udstrømning af poreluft med en varighed fra lidt under 1 døgn og op til ca. 1,5 døgn. Det afkastede luftvolumen for de 3 perioder er hhv. ca. 100, 60 og 140 m³. Koncentrationen i poreluften når ikke et stabilt niveau i løbet af hver af de to første udstrømningsperioder, og først ved afslutningen af den tredje udstrømningsperiode vurderes koncentrationsniveauet at ligge nogenlunde stabilt omkring 180 mg/m³.

Betragtes de 3 udstrømningsperioder under et, kan det beregnes, at boringen i løbet af de 10 dage har trukket luft ind fra en afstand af op til ca. 8-10 m. Det generelt stigende koncentrationsniveau over de 10 dage indikerer, at der trækkes kraftigt forurenede poreluft ind mod boringen. Da de højeste koncentrationer i den umættede zone sandsynligvis findes et sted mellem PV4 og PV5, kan dette forklare det stigende koncentrationsniveau.

Resultaterne af de 5 målerunder er afbildet logaritmisk på figur 5.17, mens de samme data er afbildet på en lineær skala i bilag 2.7.

Betragtes hele måleperioden, kan der kun registreres et overordnet eksponentielt aftagende koncentrationsniveau for de to filtre PV2 og PV4, mens koncentrationen stiger i de resterende 3 filtre. Koncentrationen i alle filtre, på nær PV4, er ved den første målerunde udført i december 1999 markant lavere end ved den anden målerunde ca. 4 mdr. senere. Samme tendens ses i øvrigt på den nærliggende lokalitet Amtsvej 2-4, jf. efterfølgende afsnit 5.4.2. Når koncentrationerne ikke som forventet aftager eksponentielt allerede fra første runde, som i både Askov og Fakse samt på andre lokaliteter, kan det skyldes, at filtrene alle ligger i udkanten af det område, hvor de højeste poreluftkoncentrationer i den umættede zone findes. Herved vil

koncentrationen indledningsvist stige i takt med, at kraftigere forurenede poreluft trækkes ud til filtrene, mens der senere på grund af den generelle luftudskiftning i den umættede zone vil ske en fortynding og dermed et koncentrationsfald. Størrelsen af dette generelle koncentrationsfald vil være afhængig af størrelsen af det passive luftflow.



Figur 5.17

Tidslig variation i den udstrømmende porelufts indhold af PCE. Samtlige filtre i perioden 2000-2002 (0-29 mdr.), Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

For de kraftigt forurenede filtre (PV2, PV4 og PV5) sker der et markant fald i koncentrationen af PCE fra 2. til 4. målerunde, svarende til perioden marts 2000- september 2001. Dette fald vurderes at være forårsaget af, at luftudskiftningen i den umættede zone har været tilstrækkelig stor til at overvinde den rate, hvormed PCE tilføres fra det overliggende lerlag. De to mindst forurenede filtre (PV1 og PV3) viser samtidig svagt stigende værdier, hvilket indikerer, at de fortsat trækker poreluft ind fra et område med kraftigere poreluftforurening.

Ved den 5. og sidste målerunde i juni 2002 er koncentrationerne igen steget i forhold til 4. runde. Der kunne ved 5. målerunde kun registreres et ganske lille flow i forhold til de tidligere målerunder, til trods for at de atmosfæriske forhold var favorable med en konstant aftagende barometerstand og et positivt differenstryk i borerne på ca. 1-2 mBar. Pejling af vandstanden i borerne på selve lokaliteten og på nabolokaliteten afslørede, at vandstanden siden 1. målerunde i december 1999 var steget ca. 1,5 m, idet driften af en række pumpeboringer tæt på de to målelokaliteter blev indstillet i løbet af måleperioden. Som direkte følge heraf er mægtigheden af den umættede zone generelt reduceret fra ca. 2-2,5 m til under 0,5-1,0 m. Da den umættede zone består af fint sand med en kapilær stighøjde på ca. 0,5 m, vil den effektive ventilerbare zone være meget tynd eller helt fraværende, hvilket forklarer det minimale flow og den meget lave luftudskiftning i den umættede zone. Samtidig vil udvaskningen af PCE gennem lerlaget forsatte upåvirket, og koncentrationen i poreluften vil, som det også er observeret, begynde at stige.

En reel vurdering af den faktiske effekt på denne lokalitet kompliceres af ovennævnte forhold. Det vurderes sammenfattende, at det observerede koncentrationsforløb i de 18 måneder mellem målerunde 2 og 4 er det mest retvisende. I løbet af denne periode er koncentrationen af PCE i filtrene PV2 og PV4 reduceret til ca. 20 mg/m³, mens koncentrationen i filtret PV5, der havde den højeste startkoncentration, er reduceret til ca. 300 mg/m³. Den procentvise reduktion i poreluftens indhold af PCE for de enkelte filtre er opgjort i tabel 5.8. Reduktionen i de tre filtre med de højeste initiale koncentrationer, varierer fra ca. 55% til ca. 95%, med en middel på ca. 74%. Gennemsnitskoncentrationen i disse 3 filtre er endvidere reduceret fra 338 til 119 mg/m³, svarende til en reduktion på ca. 74%.

Dato	31-03 2000	13-09 2001	Reduktion
Måneder fra start	5	23	(%)
PV 1	16	16	(0)
PV 2	210	11	95
PV 3	7	19	(-171)
PV 4	73	20	73
PV 5	730	325	55
Middel ¹⁾	338	119	74

1) Data for PV1 og PV3 ikke medregnet

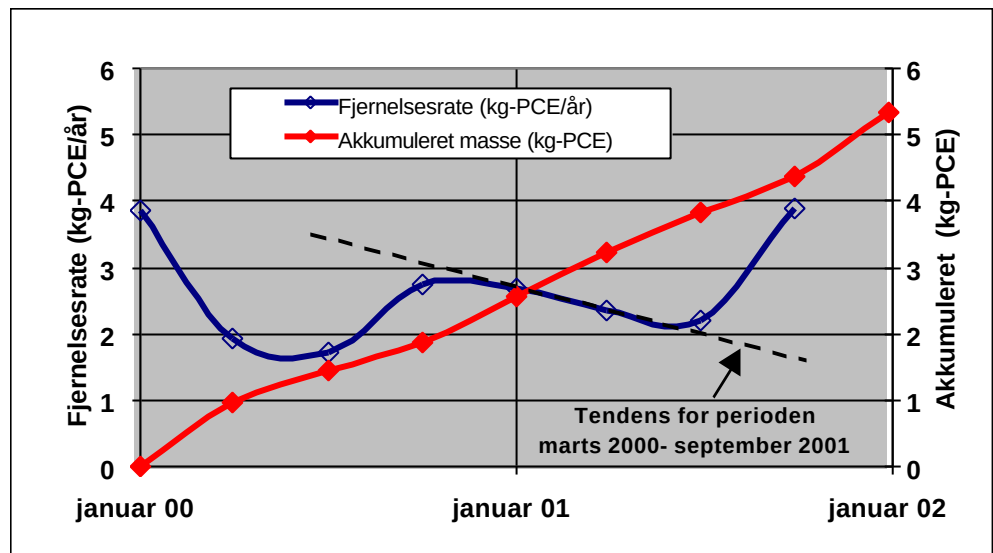
Tabel 5.8

Absolut reduktion i poreluftens indhold af PCE (mg/m³) i perioden 2000-2001, Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

Effekten af den passive ventilation på den horisontale udbredelse af PCE for perioden marts 2000 til september 2001 er afbildet i bilag 2.8. Området med koncentrationer over 500 mg/m³ er forsvundet, og de maksimale koncentrationer findes fortsat i et område omkring PV5 med niveauer omkring 300 mg/m³. Tilsvarende er området med 75 mg/m³ blevet reduceret væsentligt. Der er således tydelige indikationer på, at de passivt ventilerende boringer i en periode har været i stand til at overvinde den løbende PCE-tilførsel fra den overliggende moræner, og herved har reduceret koncentrationsniveauet væsentligt. Dette understøttes også af de beregnede fjernelsesrater, jf. næste afsnit.

5.3.3 Massefjernelsesrate

Massefjernelsesraten fra en passivt ventilerende boring er en funktion af både luftflow og koncentration. På baggrund af de beregnede tidsserier for de enkelte filtre, jf. afsnit 5.3.1, og de tilnærmede eksponentielt aftagende/stigende koncentrationer, vist på figur 5.17, er der med tidsskridt på 60 min. beregnet en gennemsnitsfjernelsesrate for dette tidsskridt. Akkumuleres denne serie, fås den samlede masse, der er fjernet fra filtret. Endvidere er der beregnet en samlet kvartalsvis fjernelsesrate. Ved at akkumulere bidraget for samtlige 5 filtre fås det samlede systems karakteristik, jf. figur 5.18. De beregnede massefjernelsesrater for både enkeltboringer og det samlede system fremgår af bilag 2.9.



Figur 5.18

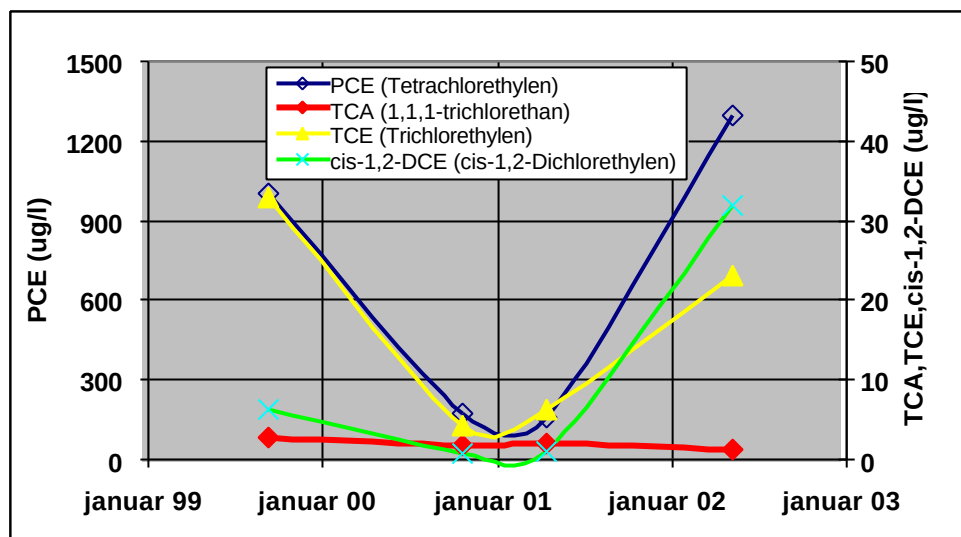
Fjernelsesrate og akkumuleret mængde PCE fra samtlige 5 filtre i perioden 2000-2002 (0-24 mdr.), Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

Fjernelsesraten varierer mellem ca. 1 og 4 kg PCE/år, men udviser ikke en tydelig overordnet tendens på grund af den tidligere beskrevne variation. På figur 5.18 er der indlagt en tendens kurve for den periode på 18 måneder, hvor det i afsnit 5.3.2 blev vurderet, at der sker en tydelig reduktion i PCE-koncentrationen som følge af de passivt ventilerende borer. Heraf ses, at fjernelsesraten aftager fra ca. 3-4 kg PCE/år og til ca. 2 kg PCE/år. Såfremt luftflowet i 2002 og senere havde haft samme størrelse som i perioden 2000-2001, indikerer tendenskurven og resultatet fra de øvrige lokaliteter, at fjernelsesraten relativt hurtigt ville kunne være nået ned på ca. 1 kg PCE/år. Da koncentrationsniveauet i PV5 er væsentligt højere end i de øvrige filtre, dominerer den beregningen af massefjernelsesraten mod slutningen af perioden.

Betragtes den akkumulerede kurve, ses det, at der i løbet af perioden 2000-2001 er fjernet ca. 5 kg PCE. Hertil kommer en mindre mængde på under 0,5 kg PCE fra indkøringen i november og december 1999. Af enkeltfiltre har PV5 bidraget med ca. 3 kg PCE, svarende til ca. 60% af totalmængden, mens PV4 bidrager med ca. 1 kg PCE, svarende til ca. 20%. De resterende 3 filtre fjerner ca. 1 kg, jf. bilag 2.9.

5.3.4 Grundvandsanalyser

Fra en enkelt boring, B8, beliggende, ca. 4 m fra det kraftigst forurenede filter PV5 er der i perioden 1999-2002 udtaget i alt 4 vandprøver fra toppen af grundvandsmagasinet til analyse for chlorerede opløsningsmidler. Boringen lå oprindeligt nedstrøms kildeområdet i perioden 1999-2001, men om dette er tilfældet i dag, hvor grundvandsstanden er steget 1,5 m, vides ikke. Analyseresultaterne er samlet i bilag 2.10, og optegnet på figur 5.19.



Figur 5.19
Grundvandskoncentrationer i monitoringsboring B8 beliggende ca. 4 m fra boring PV5, Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

I perioden fra oktober 1999, ca. 1 mdr. før forsøgets start, og til foråret 2001, ca. 18 mdr. i alt, ses et markant fald i koncentrationen af PCE, TCE og DCE. PCE koncentrationen falder fra ca. 1000 µg/l til ca. 200 µg/l. I denne periode har der været et passivt luftflow fra borerne, idet grundvandstanden endnu ikke er steget markant på dette tidspunkt, og derved har reduceret den umættede zone eller helt elimineret den. Ved den sidste måling fra maj 2002 er koncentrationen af PCE og TCE igen tilbage på udgangsniveauet, mens DCE-koncentrationen er noget større end udgangsniveauet. I samme periode kunne der kun registreres et meget lille luftflow ud af borerne. TCA-koncentrationen er meget stabil under hele perioden, og indikerer således ikke at der skulle være sket nogen væsentlige ændringer i den generelle grundvandsforurening, som findes i et større område omkring lokaliteten.

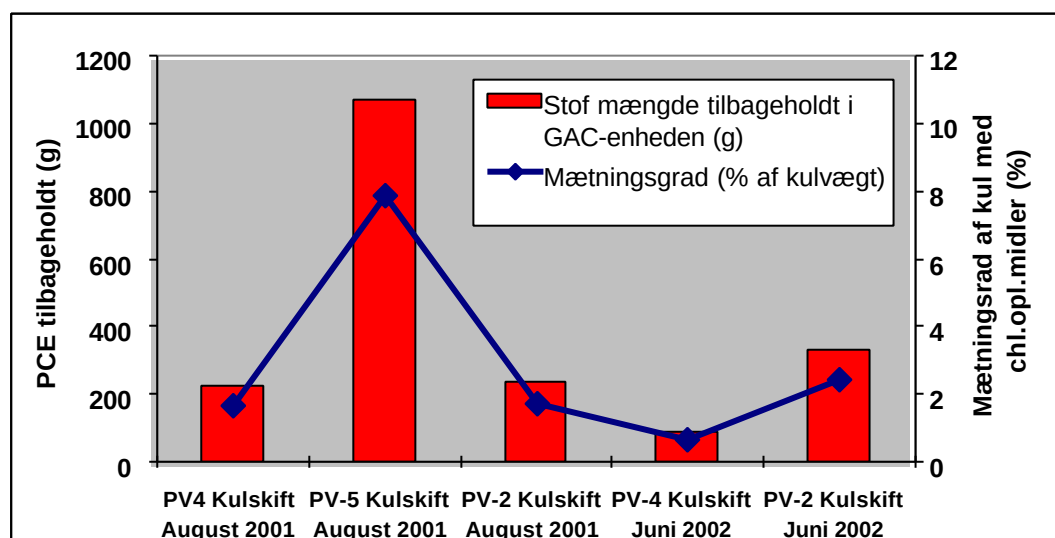
Det vurderes, at det konstaterede fald i koncentrationerne af PCE, TCE og DCE over en periode på 18 mdr., fra starten af forsøget, skyldes en direkte effekt af den passive ventilation i den nærliggende boring PV5, hvorved poreluftkoncentrationen og massen af chlorerede opløsningsmidler i den umættede zone generelt reduceres. Denne vurdering understøttes også af estimatet af PCE-mængden fjernet med luftstrømmen fra PV5 (ca. 3 kg PCE). Den stigende koncentration i 2002, vurderes at være et resultat af det begrænsede luftflow, hvorved fluxen til grundvandet begynder at stige i takt med at nyt stof tilføres fra den overliggende moræner.

5.3.5 Samlet massebalance

Under de første 2 års drift vurderes der at være fjernet ca. 5 kg PCE, og antages det, at denne mængde PCE er tilført den umættede zone over en ca. 30-års periode, svarer det til en kildestyrke på ca. 0,17 kg/år. Kildestyrken kan også vurderes ud fra den forventede årlige fjernelsesrate efter længere tids drift (2-4 års drift, såfremt det nødvendige luftflow kunne opretholdes) på ca. 1 kg, jf. afsnit 5.3.3. Endelig er den årlige udvaskning gennem dæklaget tidligere bestemt til under 0,15 kg/år, jf. afsnit 4.3.3.

Den samlede mængde chlorerede opløsningsmidler, der er adsorberet på de enkelte kulfiltre, kan vurderes ud fra kemiske analyser på blandingsprøver af kulmaterialet. Ved to lejligheder er der i forbindelse med udskiftning af filtre

udtaget prøver, og i begge tilfælde kunne der konstateres gennembrud på kulfiltrene. Analyseresultaterne er sammenfattet i bilag 2.11. Figur 5.20 viser variationen i den samlede mængde PCE tilbageholdt på hver af de skiftede GAC-enheder, samt den totale mætningsgrad af kullene med chlorerede opløsningsmidler.



Figur 5.20
Effektivitet af GAC-enheder vurderet ud fra analyser på stikprøver af kullene, Prins Valdemars Allé 14, Allerød.

Hovedkomponenten, som påvises og tilbageholdes i GAC-enheden, er som forventet PCE, og ved begge kulskift udgør PCE generelt 85-99% af totalindholdet af chlorerede opløsningsmidler. Udover PCE er der også påvist nedbrydningsproduktet TCE i poreluften, samt stoffet TCA, som vurderes at komme fra en forurening på en nabogrund. Den totale mætning af kullene med chlorerede opløsningsmidler varierer fra 1 til 8% (vægt), med et gennemsnit på ca. 3% (vægt). Dette er noget mindre end den forventede adsorptionskapacitet på ca. 1-2 kg pr. filter, og en tilhørende mætning af kullene på op til 20% (vægt), jf. afsnit 3.2. Årsagen til den lavere kapacitet er sandsynligvis den høje fugtighed i luftstrømmen og evt. kondensation af vanddamp på oversiden af kullene.

Ved de to kulskift er der samlet fjernet ca. 1,9 kg PCE, og der er herudover foretaget endnu et kulskift efter gennembrud i PV2. Der vurderes således at være opsamlet i alt ca. 2 kg PCE på GAC-enheder, mens de resterende 3 kg, som vurderes at være fjernet, er afkastet til det fri igennem kulfiltre med gennembrud.

Der må forventes en vis variation i kildestyrken fra år til år, men ud fra det samlede datasæt vurderes det, at den årlige kildestyrke til den umættede zone er i størrelsesordenen 0,1-1 kg PCE.

5.4 Amtsvej 2-4, Allerød

Måleresultaterne for hele den 2-årige monitoringsperiode er optegnet og vedlagt i bilag 3.3-3.11. På grund af en periodisk defekt lufthastighedsmåler, svigtende strømforsyning og oversvømmelse i målebrønden, foreligger der ikke en fuld-stændig kontinuert måleserie for alle parametre. Som beskrevet i afsnit 2.3 og under afsnit 5.3, er der derfor også for denne lokalitet genereret

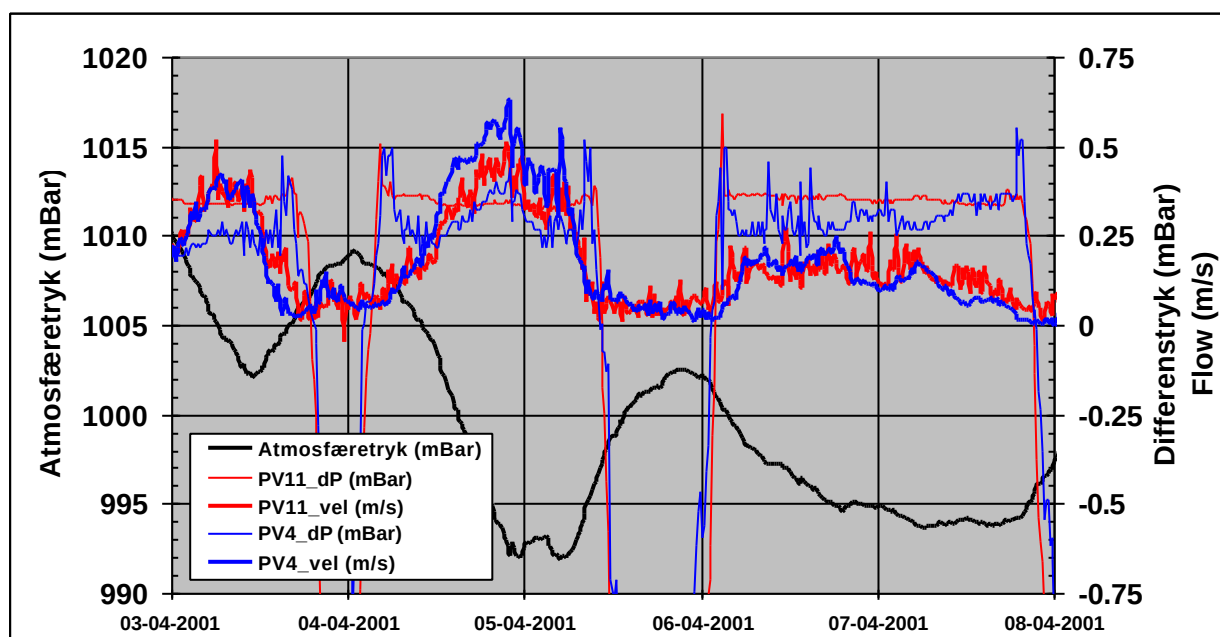
syntetiske data for differenstryk og luftflow, således at bl.a. den samlede massefjernelse kan beregnes. De fuldstændige serier er vist i bilag 3.3 og 3.4.

Lokaliteten er beliggende få hundrede meter fra den tidligere beskrevne lokalitet i afsnit 5.3 (Prins Valdemars Alle 14), og der ses, som følge af den stort set identiske hydrogeologi, kun en meget lille variation i de centrale måleparametre mellem lokaliteterne. Det er derfor valgt at uddybe og diskutere en række af de parametre, der ikke blev fremhævet og optegnet under afsnit 5.3, og samtidig henvise til dette afsnit for en række af de helt basale sammenhænge.

5.4.1 Luftflow

Sammenhørende data for atmosfæretryk og differenstryk fremgår af bilag 3.3. Det årlige variationsmønster er som beskrevet under afsnit 5.3.1. På denne lokalitet registreres der ikke noget reference-differenstryk i en afblændet boring, men kun differenstryk i PV11 i selve målebrønden. Her er det minimale differenstryk i en periode med stigende atmosfæretryk (og dermed lukket en-vejs-ventil) ca. -11 mBar, hvilket er sammenligneligt med målingerne på den nærliggende lokalitet.

Til illustration af den generelle sammenhæng mellem de forskellige måleparametre, og til sammenligning af tryk- og flowforhold mellem de to nærliggende lokaliteter, er der udvalgt 5 dages målinger fra april 2001, jf. figur 5.21.

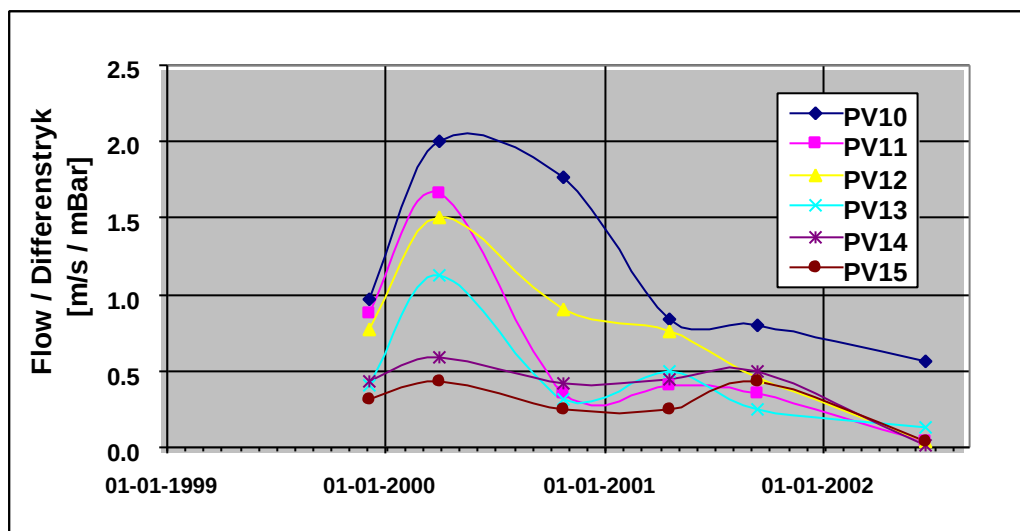


Figur 5.21

Sammenligning af differenstryk og luftflow mellem lokaliteterne Prins Valdemars Alle 14 (PV4) og Amtsvej 2-4 (PV11) for en periode på 5 dage i april 2001.

Perioden omfatter passagen af tre lavtryk, hvorunder atmosfæretrykket falder med en rate på op til $0,8$ mBar/time over 24 timer. Under faldende atmosfæretryk og med udstrømning fra filtrene genereres et positivt differenstryk på op til $0,5$ mBar i begge målebrønde (PV4_dP, PV11_dP). Forløbet i de to målebrønde er næsten identisk, hvilket bekræfter, at de hydrogeologiske forhold er relativt ensartede for de to grunde. Samme

ensartede forløb ses i hele måleperioden 2000-2001. Tilsvarende ses også en meget ensartet variation i luftflowet (her vist som luft hastigheden i filterrøret) ud af de to borer (PV4_vel, PV11_vel), selvom der er en del mere støj på målingerne fra PV11. Da udstrømningsforløbet for de to borer også er næsten identiske, indikerer dette, at også den horisontale permeabilitet i den umættede zone i begge borer er sammenlignelig.



Figur 5.22

Tidslig udvikling i den specifikke luftydelse for de enkelte filtre. Specifik ydelse beregnet som forholdet mellem luftflow (m/s) og differenstryk (mBar) ved de enkelte prøvetagningsrunder, Amtsvej 2-4, Allerød.

Udover årstidsvariationen i luftflowet forårsaget af de atmosfæriske forhold, er der på de to lokaliteter i Allerød konstateret et meget lavere flow i 2002 end i den primære måleperiode 2000-2001. Dette kan illustreres ved det specifikke luftflow for hvert filter ved de gennemførte målerunder, jf. figur 5.22. Det specifikke luftflow indikerer, hvor stort et luftflow, der kan opnås ved et givent differenstryk, og er således en funktion af både permeabiliteten i dæklaget samt tykkelsen og permeabiliteten i den filtersatte umættede zone. Den eneste parameter, der har ændret sig væsentligt, er tykkelsen af den umættede zone, idet grundvandsstanden er steget ca. 1,5-2 m siden 2000. Dette afspejles i det specifikke flow, der for specielt PV10, PV11 og PV13 viser et jævnt aftagende forløb igennem hele måleperioden, bortset fra den første målerunde gennemført d. 3.12.1999, hvor orkanagtige vejrforhold ramte Danmark. Årsagen til de afvigende lave, specifikke flow d. 3.12.1999 skyldes sandsynligvis, at atmosfæretrykket faldt så ekstremt hurtigt, at flowet i boringen ikke har nået at indstille sig. Ved den sidste målerunde kunne der kun registreres et minimalt eller intet flow i PV11-PV15. Også i PV10 var den specifikke ydelse reduceret, men lå stadig lidt over gennemsnittet for samtlige filtre i 2000.

Variationen og størrelsen af luftflowet fra målebrønd PV11 er stort set identisk med det observerede forløb i PV4 på nabolokaliteten, og samtlige filtre på de to grunde følger således samme rytme for udstrømningen af poreluft. Ud fra samtidige øjebliksmålinger af luftflowet i samtlige 6 filtre (PV10-PV15) kan udstrømnings-mønstret i de enkelte filtre tilnærmet beregnes ved skalering i forhold til den kontinuert målte variation af luftflowet i PV11. Da flowet i PV11 og i PV4 på den nærliggende lokalitet er fundet stort set identiske, er de statistiske egenskaber for deres udstrømningsforløb også ens, jf. tabel 5.7.

Baseret på disse tidsserier, kan der udføres simpel deskriptiv statistik til beskrivelse af forskellige egenskaber for den passive luftudstrømning, jf. tabel 5.9 og bilag 3.6.

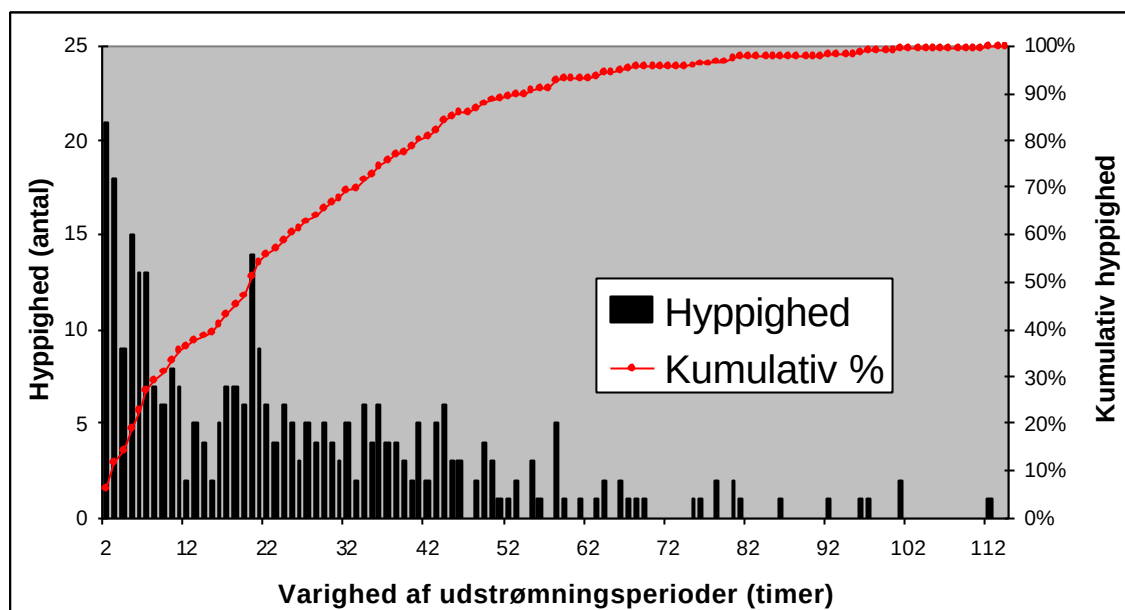
Som det fremgår af tabel 5.9, er det gennemsnitlige årlige luftflow fra et enkelt filter ca. $0,49 \text{ m}^3/\text{t}$. Variationsbredden for det gennemsnitlige flow for de enkelte filtre er fra $0,23$ til $0,83 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket indikerer en ret ensartet effektiv horisontal permeabilitet på tværs af grunden. Under ekstremt hurtige fald i atmosfæretrykket er der kortvarigt målt flow op til ca. $13 \text{ m}^3/\text{t}$.

Flow fra enkeltfiltre:	
Minimalt årligt middel luftflow findes i PV15	$0,23 \text{ m}^3/\text{t}$
Maksimalt årligt middel luftflow findes i PV10	$0,83 \text{ m}^3/\text{t}$
Gennemsnitligt årligt middel luftflow for de 6 filtre i PV10-PV15	$0,49 \text{ m}^3/\text{t}$
Maksimalt øjeblikkeligt luftflow findes i PV10	$13,3 \text{ m}^3/\text{t}$
Statistik på serie med luftflow i PV11:	
Antal udstrømningsperioder	333
Gennemsnitlig varighed af en enkelt udstrømningsperiode	25 timer
Gennemsnitlig afkastet luftvolumen pr. udstrømningsperiode	35 m^3
Samlet tidsmæssig varighed af udstrømningsperioder	47 %
Flow fra totalsystemet med i alt 6 enkelt filtre i PV10-PV15:	
Samlet årligt middel luftflow	$2,95 \text{ m}^3/\text{t}$
Samlet øjeblikkeligt maksimalt luftflow	$43,7 \text{ m}^3/\text{t}$

Tabel 5.9

Simple statistiske egenskaber for variationen af luftflowet i perioden 2000-2001. Middelflow omregnet til årlige værdier, idet der kun sker udstrømning af poreluft i ca. 47% af tiden, Amtsvej 2-4, Allerød.

Der har i alt været registreret 333 udstrømningsperioder med en varighed større end 2 timer, jf. tabel 5.9. Udstrømningsperiodernes længde har en aritmetrisk gennemsnitsvarighed på 25 timer med et aritmetrisk gennemsnit for det afkastede luftvolumen på 35 m^3 . For det totale system (6 enkeltfiltre) kan det gennemsnitlige årlige luftflow skønnes til ca. $2,95 \text{ m}^3/\text{t}$. Det maksimale flow er i en kortvarig periode ca. $43,7 \text{ m}^3/\text{t}$, hvilket svarer til et gennemsnitligt luftflow for hver af de seks boringer på ca. $7,3 \text{ m}^3/\text{t}$.



Figur 5.23

Histogram for varigheden af hver ud de enkelte 333 udstrømningsperioder i PV11. Data for perioden 2000-2001. Intervallet anvendt for tiden er 1 time, Amtsvej 2-4, Allerød.

For at vurdere, om længden af udstrømningsperioderne følger en statistisk fordeling som fx en logaritmisk normalfordeling, er der optegnet et histogram, jf. figur 5.23. Fordelingen ligner ikke umiddelbart en log-normal fordeling. I forhold til den aritmetriske middelværdi for længden af udstrømningsperioderne, er medianværdien ca. 20 timer og således lidt lavere. Det samme er tilfældet for det afkastede luftvolumen, hvor medianværdien er ca. 23 m³, og således væsentlig lavere end det simple gennemsnit på 35 m³. De hyppigst forekommende udstrømningsperioder er under 8 t i varighed, men der ses også en relativ stor hyppighed for udstrømningsperioder med en varighed lige omkring 20 t. Den relativt store hyppighed omkring de 20 timer kan være relateret til den 24-timers periode, som er indlejret i det atmosfæriske tryks naturlige variation som følge af solindstrålingens døgnsvingning /ref. 23/. I den ekstreme ende af skalaen ses en lille gruppe på ca. 15 hændelser, hvor der har været kontinuert udstrømning i mere end 72 timer (3 døgn) og helt op til 112 timer (4,5 døgn).

5.4.2 Poreluftkoncentrationer

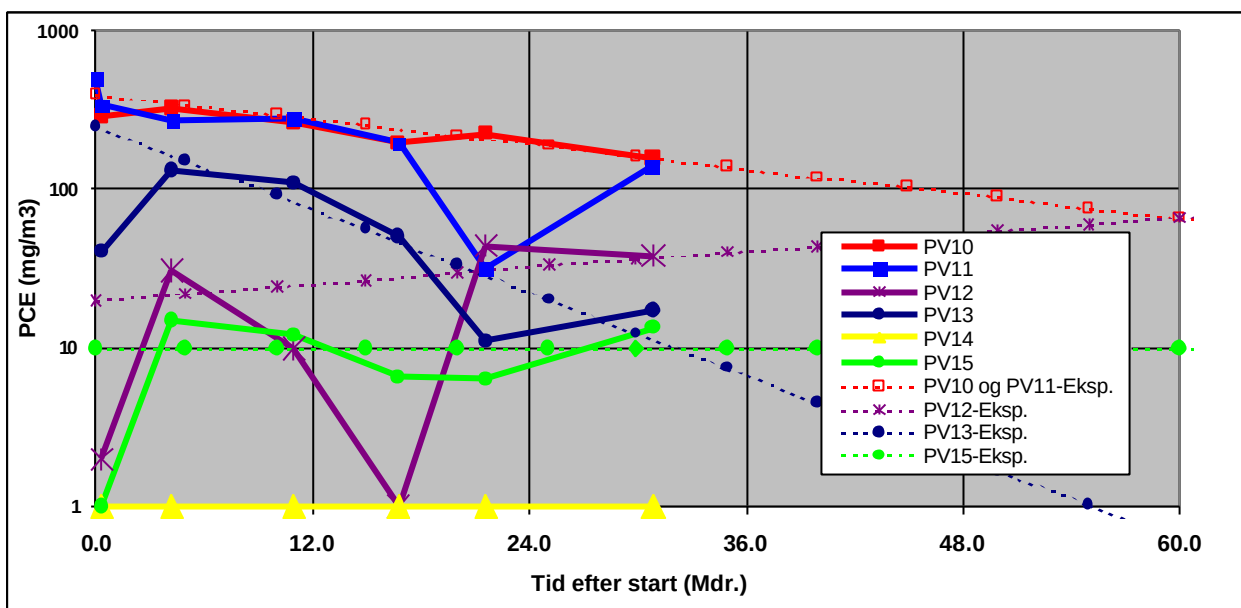
For at følge udviklingen i poreluftens koncentration af PCE i måleperioden, er der gennemført en række målinger i de 6 passivt ventilerende filtre, jf. bilag 3.7. Der er udført i alt 6 monitoringsrunder, hvor koncentrationerne af den udstrømmende luft er målt over ca. 15 min. Herudover er der i målebrønden i PV11 udført 3 kontinuerte måleserier med 15 min.'s intervaller af 1-2 ugers varighed, med det formål at få indsigt i variationen af koncentrationen over flere efterfølgende udstrømningsperioder i løbet af den 2-årige måleperiode. Samtlige måledata er afbildet i bilag 3.7. Resultaterne af de 5 målerunder er afbildet logaritmisk på figur 5.23, mens de samme data er afbildet på en lineær skala i bilag 3.7.

Betragtes hele måleperioden, kan der registreres et overordnet eksponentielt aftagende koncentrationsniveau for de 3 filtre PV10, PV11 og PV13, mens koncentrationen stiger i PV12 og er uændret i PV14 og PV15.

Koncentrationen i de tre filtre PV12, PV13 og PV15 er ved den første målerunde, udført i december 1999, markant lavere end ved den anden målerunde ca. 4 mdr. senere. Samme tendens ses i øvrigt på den nærliggende lokalitet på Prins Valdemars Alle, jf. tidligere afsnit 5.3.2. Når koncentrationerne ikke som forventet aftager eksponentielt allerede fra første runde, på samme måde som for de to filtre PV10 og PV11, og i øvrigt som i både Askov og Fakse og i andre sager, kan det skyldes, at filtrene alle ligger i udkanten af det område, hvor de højeste poreluftkoncentrationer i den umættede zone findes. Herved vil koncentrationen indledningsvist stige i takt med at kraftigere forurenede poreluft trækkes ud til filtrene, mens der senere på grund af den generelle luftudskiftning i den umættede zone vil ske en fortynding og dermed et koncentrationsfald. Størrelsen af dette generelle koncentrationsfald vil være afhængig af størrelsen af det passive luftflow.

For de tre kraftigt forurenede filtre (PV10, PV11 og PV13) sker der et markant fald i koncentrationen af PCE fra 2. til 4. målerunde, svarende til perioden marts 2000- september 2001. Dette fald vurderes at være forårsaget af, at luftudskiftningen i den umættede zone har været tilstrækkelig stor til overvinde den rate hvormed PCE tilføres fra det overliggende lerlag. PV12, der ligger i udkanten af området med de initialt højeste koncentrationer, viser overordnet en svagt stigende tendens. En enkelt meget lav værdi målt i marts 2001 afviger dog fra de øvrige. De svagt stigende værdier indikerer, at der trækkes poreluft ind fra området mellem PV10, PV11 og PV13, hvor den kraftigste poreluftforurening forventes.

Ved den 6. og sidste målerunde i juni 2002 er koncentrationerne i specielt PV11 og PV13 igen steget markant i forhold til 5. runde. Netop disse to filtre havde i juni 2002 også en markant lavere specifik ydelse i forhold til de tidligere målerunder, jf. figur 5.22. Det resulterende minimale flow og den meget lave luftudskiftning i den umættede zone kan således ikke i den denne periode opveje udvaskningen af PCE fra det overliggende lerlag. PV10 viser derimod en fortsat aftagende tendens fra 5.



Figur 5.24
Tidslig variation i den udstrømmende porelufts indhold af PCE. Samtlige filtre i perioden 2000-2002 (0-29 mdr.), Amtsvej 2-4, Allerød

til 6. målerunde, hvilket er i god overensstemmelse med at den specifikke ydelse ikke er reduceret væsentligt i denne periode, jf. figur 5.22.

En reel vurdering af den faktiske effekt på denne lokalitet kompliceres af ovennævnte forhold. Det vurderes sammenfattende, at det observerede eksponentielle koncentrationsforløb i de 18 måneder, mellem målerunde 2 og 5, er det mest retvisende, idet der i denne periode har været en relativt konstant tykkelse af den umættede zone. I løbet af denne periode er koncentrationen af PCE i filtrene PV4 og PV13 reduceret til ca. 10-30 mg/m³, mens koncentrationen i filter PV10, der havde den højeste startkoncentration, er reduceret til ca. 225 mg/m³.

Den procentvise reduktion i poreluftens indhold af PCE for de enkelte filtre er opgjort i tabel 5.10. Reduktionen i de tre filtre med de højeste initiale koncentrationer varierer fra 29% til 92%, med en middelværdi på 67%. Gennemsnitskoncentrationen i disse 3 filtre er således reduceret fra 242 til 90 mg/m³, svarende til en reduktion på ca. 63%.

Dato	31-03 2000	13-09 2001	Reduktion
Måneder fra start	5	23	(%)
PV 10	320	226	29
PV 11	273	32	88
PV 12	31	44	(-42)
PV 13	134	11	92
PV 14	1	1	(0)
PV 15	15	6	(57)
Middel ¹⁾	242	90	63

2) Data for PV12, PV14 ikke medregnet

Tabel 5.10

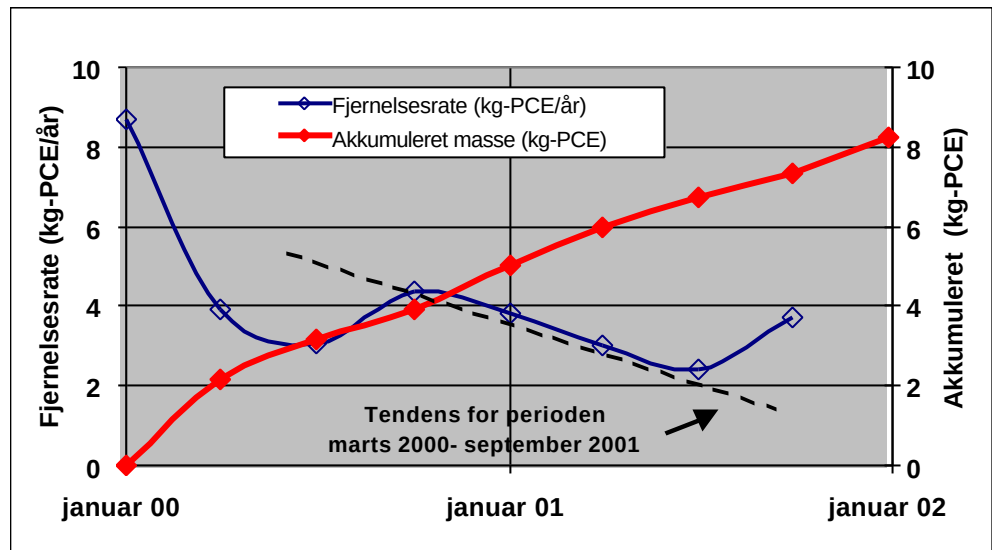
Absolut reduktion i poreluftens indhold af PCE (mg/m³) i perioden 2000-2001, Amtsvej 2-4, Allerød.

Effekten af den passive ventilation på den horisontale udbredelse af PCE for perioden marts 2000 til september 2001 er afbildet i bilag 3.8. Området med koncentrationer over 500 mg/m³ omkring PV11 er forsvundet, og de maksimale koncentrationer findes nu i et område ved PV10 med niveauer omkring 225 mg/m³. Tilsvarende er området med 150 mg/m³ blevet reduceret væsentligt. Der er således tydelige indikationer på, at de passivt ventilerende borer i perioden har været i stand til at overvinde den løbende PCE-tilførsel fra den overliggende moræneler, og herved har reduceret koncentrationsniveauet væsentligt. Dette understøttes også af de beregnede fjernelsesrater, jf. næste afsnit. De to filtre PV14 og PV15 har under hele perioden ligget udenfor området med 10 mg/m³, og har tilsyneladende ikke påvirket hverken udbredelsen eller koncentrationen af PCE i den umættede zone.

5.4.3 Massefjernelsesrate

Massefjernelsesraten fra en passivt ventilerende boring er en funktion af både luftflow og koncentration. På baggrund af de beregnede tidsserier for de enkelte filtre, jf. afsnit 5.4.1, og de tilnærmede eksponentielt aftagende/stigende koncentrationer, vist på figur 5.24, er der med tidsskridt på 60 min. beregnet en gennemsnitsfjernelsesrate for dette tidsskridt. Akkumuleres denne serie, fås den samlede masse, der er fjernet fra filtret. Endvidere er der beregnet en samlet kvartalsvis fjernelsesrate. Ved at akkumulere bidraget for samtlige 6 filtre fås det samlede systems karakteristik, jf. figur 5.25. De beregnede massefjernelsesrater for både enkeltboringer og det samlede system fremgår af bilag 3.9.

Fjernelsesraten varierer mellem 2 og 9 kg PCE/år, og udviser en overordnet aftagende tendens. På figur 5.25 er der indlagt en tendenskurve for den periode på 18 måneder, hvor det i afsnit 5.4.2 blev vurderet, at der sker en tydelig reduktion i PCE-koncentrationen som følge af de passivt ventilerende borer. Heraf ses, at fjernelsesraten aftager fra ca. 5 kg PCE/år og til ca. 2 kg PCE/år. Såfremt luftflowet i 2002 og senere havde haft samme størrelse som i perioden 2000-2001, indikerer tendenskurven og resultatet fra de øvrige lokaliteter, at fjernelsesraten relativt hurtigt ville kunne være nået ned på ca. 1 kg PCE/år. Da koncentrationsniveauet i PV10 og PV11 er væsentligt højere end i de øvrige filtre, dominerer disse beregningen af massefjernelsesraten mod slutningen af perioden.



Figur 5.25

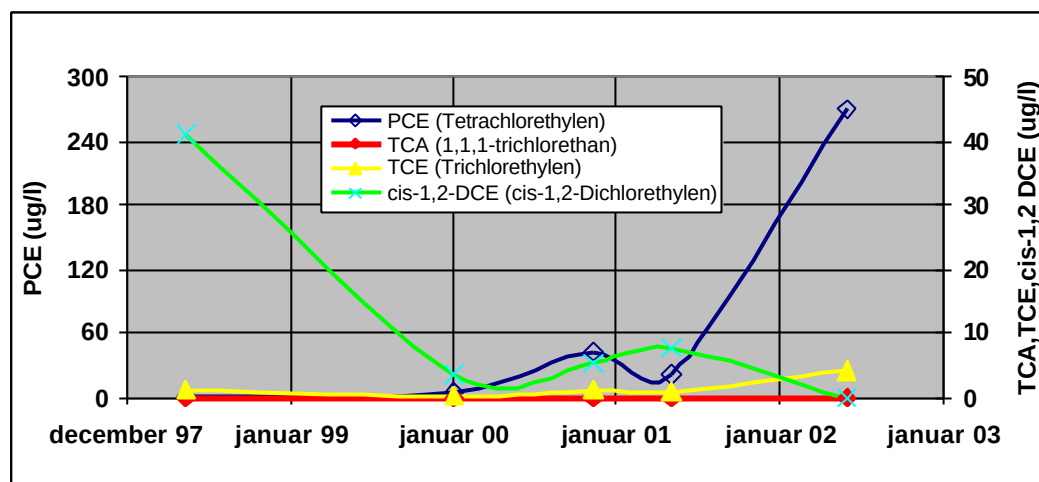
Fjernelsesrate og akkumuleret mængde PCE fra samtlige 5 filtre i perioden 2000-2002 (0-24 mdr.), Amtsvej 2-4, Allerød

Betragtes den akkumulerede kurve, ses det, at der i løbet af perioden 2000-2001 er fjernet ca. 8 kg PCE. Hertil kommer en mindre mængde på under 1 kg PCE fra indkøringen i november og december 1999. Af enkeltfiltre har PV10 og PV11 bidraget med hhv. ca. 4 og 3 kg PCE, svarende til ca. 89% af totalmængden, mens PV13 bidrager med ca. 0,5 kg PCE, svarende til ca. 6%. Det laveste bidrag ses fra PV14 og PV15, der kun har fjernet hhv. 0,006 og 0,04 kg PCE, jf. bilag 3.9.

5.4.4 Grundvandsanalyser

Fra en enkelt boring GP25-2, beliggende ca. 5 m fra det relativt lavt forurenede filter PV15, er der i perioden 2000-2002 udtaget i alt 4 vandprøver fra toppen af grundvandsmagasinet til analyse for chlorerede opløsningsmidler. Endvidere foreligger der en enkelt analyse fra 1997. Boringen lå oprindeligt udenfor selve kildeområdet under det tidligere renseri, og i udkanten af forureningsfanen fra kildeområdet. Om dette er tilfældet i dag, hvor grundvandsstanden er steget ca. 1,5 m, vides ikke. Analyseresultaterne er samlet i bilag 3.10, og optegnet på figur 5.26.

I perioden fra maj 1998 og til ca. 2 mdr. efter forsøgets start i november 1999, ses et markant fald i koncentrationen af cis-1,2-DCE, mens specielt PCE-koncentrationen er relativt stabil omkring 2-5 µg/l. I perioden 2000-2001, hvor der har været et passivt luftflow fra borerne, ses en stigende koncentration af specielt PCE og cis-1,2-DCE.



Figur 5.26

Grundvandskoncentrationer i monitoringsboring GP25-2 beliggende ca. 5 m fra boring PV15.

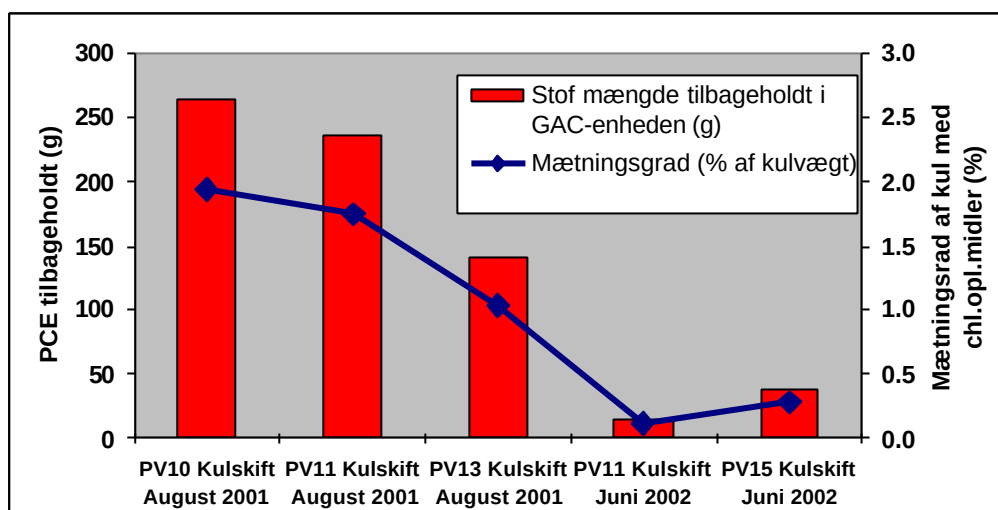
Da der i den nærmest liggende passivt ventilerende boring PV15 er registreret et stabilt og lavt indhold af PCE i poreluften ($6-15 \text{ mg/m}^3$), vurderes det stigende indhold i grundvandet ikke at være styret af processer nær PV15. Det vurderes, at der kan være sket både en drejning af den oprindelige PCE-fane i sydlig retning, og dels en stigende masseflux til grundvandet i kildeområdet som følge af den stigende grundvandstand i området.

På grund af den usikre placering af filtret i forhold til strømningsretningen og den stigende grundvandsstand i perioden, samt det forhold at filtret ligger udenfor kildeområdet, vurderes det sammenfattende, at den observerede udvikling i grundvandets indhold af PCE mv. ikke kan tilskrives effekter af den passive ventilation.

5.4.5 Samlet massebalance

Under de første 2 års drift vurderes der at være fjernet ca. 8 kg PCE, og antages det, at denne mængde PCE er tilført den umættede zone over en ca. 30-års periode, svarer det til en kildestyrke på ca. $0,34 \text{ kg/år}$. Kildestyrken kan også vurderes ud fra den forventede årlige fjernelsesrate efter længere tids drift (2-4 års drift såfremt det nødvendige luftflow kunne opretholdes) på ca. 1 kg, jf. afsnit 5.4.3. Endelig er den årlige udvaskning gennem dæklaget tidligere bestemt til under $0,15 \text{ kg/år}$, jf. afsnit 4.3.3.

Den samlede mængde chlorerede opløsningsmidler, der er adsorberet på de enkelte kulfiltre, kan vurderes ud fra kemiske analyser på blandingsprøver af kulmaterialet. Ved to lejligheder er der i forbindelse med udskiftning af filtre udtaget prøver, og for kulsiftet i august 2001 kunne der konstateres gennembrud på de tre kulfiltre. Analyseresultaterne er sammenfattet i bilag 3.11. Figur 5.27 viser variationen i den samlede mængde PCE tilbageholdt på hver af de skiftede GAC-enheder, samt den totale mætningsgrad af kullene med chlorerede opløsningsmidler.



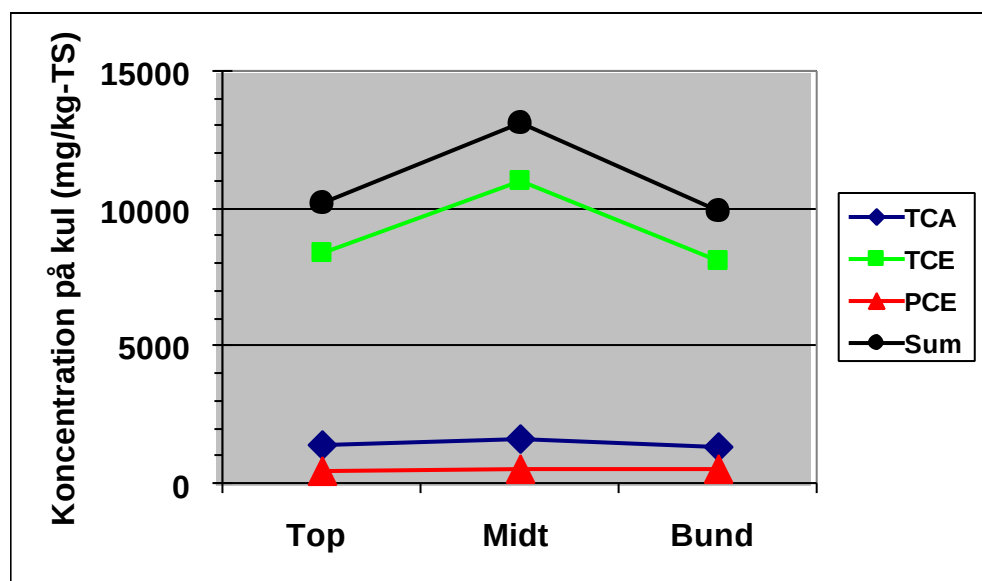
Figur 5.27
Effektivitet af GAC-enheder vurderet udfra analyser på stikprøver af kullene, Amtsvej 2-4, Allerød.

Hovedkomponenten, som påvises og tilbageholdes i GAC-enheden, er som forventet PCE, og ved begge kulskift udgør PCE generelt 97-98% af totalindholdet af chlorerede opløsningsmidler. Udover PCE er der også påvist nedbrydnings produktet TCE i poreluften, samt stoffet TCA, som vurderes at komme fra en forurening på en nabogrund. Kun i PV15 er der ved kulskiftet i juni 2002 påvist en relativ høj mætning af cis-1,2-DCE og TCE. Da der ikke er påvist specielt høje værdier af disse to stoffer i poreluften, kan stofferne være dannet ved nedbrydning af PCE på selve kullene. Den totale mætning af kullene med chlorerede opløsningsmidler efter gennembrud varierer fra ca. 1 til 2% (vægt). Dette er noget mindre end den forventede adsorptionskapacitet på ca. 1-2 kg pr. filter, og en tilhørende mætning af kullene på op til 20% (vægt), jf. afsnit 3.2. Årsagen til den lavere kapacitet er sandsynligvis den høje fugtighed i luftstrømmen og evt. kondensation af vanddamp på oversiden af kullene.

Ved de to kulskift er der samlet fjernet ca. 0,7 kg PCE, og der er sandsynligvis opsamlet ca. 0,3 kg i PV10, der ikke har været skiftet siden august 2001. Der vurderes således at være opsamlet i alt ca. 1 kg PCE på GAC-enheder, mens de resterende 7 kg, som der vurderes at være fjernet, er afkastet til det fri igennem kulfiltre med gennembrud.

Der må forventes en vis variation i kildestyrken fra år til år, men udfra det samlede datasæt vurderes det, at den årlige kildestyrke til den umættede zone er i størrelsesordenen 0,1-1 kg PCE.

For at kunne vurdere om GAC-enhederne opsamler de chlorerede opløsningsmidler jævnt ned igennem filtret, er der på et projekt udenfor teknologiprojektet udtaget prøver af kulmaterialet til kemisk analyse. På den pågældende lokalitet, er de primære forureningskomponenter TCE, TCA og PCE. Den samlede koncentration af chlorerede opløsningsmidler varierer fra ca. 10-13.000 mg/kg-TS. Den højeste koncentration af den dominerende komponent TCE ses midt i filtret, men overordnet indikerer en analyse en relativ homogen fordeling ned igennem filtret. Indholdet af TCA og PCE viser en mindre variation over dybden end TCE. De målte totalkoncentrationer svarer til en mætning af kullene på ca. 1-1,3 % (vægt), og er i samme størrelsesorden som målt på projektlokaliteterne.



Figur 5.28

Variation i koncentration af chlorerede opløsningsmidler på stikprøver af kul udtaget i top, midt og bund af en GAC-enhed efter gennembrud. Lokaliteten er forurenet med alle de viste stoffer men med TCA og TCE som de dominerende.

6 Diskussion

6.1 Anlægskomponenter

De enkelte anlægskomponenter blev designet ud fra specifikke krav til bl.a. funktion og driftssikkerhed. I det følgende vurderes ud fra driftserfaringerne fra den 2-årige måleperiode, i hvilket omfang disse krav er blevet opfyldt.

6.1.1 Prototype-systemet

På de to lokaliteter i Allerød er prototype-systemet, beskrevet i afsnit 3.3 (se figur 3.1 og figur 4.2), implementeret. Det skal ved brug af dette design sikres, at selve dækslet på brønden hviler på en gummipakning, således at brønden er helt tæt. Der kan også med fordel monteres en lille vandnæse på undersiden af dækslet, således at den vanddamp, der i perioder kondenserer her, ledes ud i siden af brønden og ikke drypper ned på kulfiltret, hvor det kan forårsage en kraftig korrosion. Der har ikke været problemer med vand i disse brønde, hvorimod der i selve monitorings-brøndene, der består af 2 stablede betonkegler, har været problemer med vandindtrængning gennem utætte samlinger imellem ringene. Det har her været nødvendigt at installere en pumpeump med en fastmonteret drænpumpe (se figur 4.3). Der har ikke været problemer med øvrige komponenter (filterrør, blindrør, overgangsstykke til kulfilter, svane Hals til afkast).

Til ensretning af luftflowet i boringen og for at opnå et minimalt tryktab, har der været anvendt en specialdesignet en-vejs-ventil, jf. afsnit 3 og bilag 1. En-vejs-ventilen har teknisk set fungeret efter hensigten, og det har ikke været nødvendigt at foretage udskiftninger eller ændringer i designet. Der har kunnet konstateres en smule korrosion på metaltrådene i ventilen, men dette har ingen betydning for funktionen, da trådene alene fungerer som stop for selve plasticklappen, jf. bilag 1.5. Ved enkelte monitoringsrunder, er der fundet et eller flere stykker af kulgranulatet fra GAC-enheden i selve ventilen. Få stykker kulgranulat vil ikke kunne forhindre ventilen i at fungere, men det kan overvejes at lave de indvendige huller i GAC-enheden en anelse mindre for at forhindre kulgranulat i at falde igennem hullerne. Der er kun foretaget måling af det samlede tryktab for luftens passage igennem hhv. en-vejs-ventilen og kulfiltret (Allerød), og en-vejs-ventil samt rørføring fra brønd og til afkast over tag (Askov). Det vurderes, at der i hele målerperioden har været et tryktab på under 0,5 mBar for luftflow op til 10-15 m³/t, og dette bekræfter således de tidligere gennemførte laboratorieforsøg, jf. bilag 1.5.

Til rensning af den udstrømmende poreluft før udledning til atmosfæren, har der været anvendt et specialdesignet kulfilter - i denne rapport også benævnt en GAC-enhed (GAC er en engelsk forkortelse for "Granular Activated Carbon"), jf. afsnit 3 og bilag 1. Filtrene har teknisk set fungeret som forventet, og det har ikke været nødvendigt at ændre designet. Som for metaldelene i en-vejs-ventilerne, har der på ydersiden af enkelte filtre været tegn på kraftig korrosion. I et enkelt tilfælde har dette medført, at der er opstået en 5-10 cm lang revne i kulfiltret. Ved dette filter kunne det samtidig konstateres, at kondensvand var løbet ned på ydersiden af filtret, og at der

havde været gennembrud på filtret i en periode. Kombinationen af en meget høj PCE-koncentration i luften og en fugtig metaloverflade har givetvis medført et meget korrosivt miljø. Tryktabet igennem filtret alene vurderes i hele måleperioden at være negligeabelt, og bekræfter således de tidligere gennemførte laboratorieforsøg, jf. bilag 1.6. Der er således ikke noget, der indikerer, at modstanden i kulfiltret øges over tid som følge af kondens af vanddamp på kullenes overflade.

Kulfiltrenes evne til at tilbageholde den primære forureningskomponent, PCE, kan vurderes udfra de gennemførte analyser på stikprøver af kul udtaget fra i alt 12 filtre. Den gennemsnitlige mætningsgrad af chlorerede opløsningsmidler for filtre, hvor der er registreret et gennembrud er ca. 3% (w/w), svarende til at der er adsorberet ca. 450 g på de i alt ca. 13,6 kg kul i hvert filter. Kun et enkelt filter viste en mætningsgrad på 8% (w/w), svarende til at der er tilbageholdt lidt over 1 kg chlorerede opløsningsmidler i filtret. Generelt udgør PCE 95% af den totale masse af chlorerede opløsningsmidler opsamlet i filtrene. Den målte gennemsnitlige mætning på ca. 3% er noget lavere end den forventede på ca. 20% (w/w). I praksis betyder dette, at sorptionskapaciteten for et filter er ca. 450 gram, hvilket er noget lavere end den forventede kapacitet på 1-2 kg. Årsagen til at sorptionskapaciteten er noget lavere end forventet, er sandsynligvis den relativt høje luftfugtighed i poreluften (5-10 g vand/m³).

6.1.2 System med længere rørføringer før afkast

På lokaliteterne i Askov og Fakse er der fra hvert enkelt filter en rørføring på op til ca. 25 m, inden afkast direkte til atmosfæren (Askov) eller til et samlet manifold med et centralt kulfilter (Fakse), jf. afsnit 4.5.4 og 4.4.4. De forventede tryktab for de valgte 2" hhv. 3" rør over disse rørstrækninger vil hovedsageligt findes som enkelttab ved rørbøjninger, jf. bilag 1.3.

For lokaliteten i Askov er der under kortvarige perioder med relativt store flow på op til ca. 10 m³/t målt et samlet tryktab på ca. 1-2 mBar. Dette svarer til ca. 50% af det samtidigt målte differenstryk i referencefiltret. Den helt overvejende del af dette tryktab sker i selve rørføringerne, mens en-vejs-ventilens bidrag til det totale tryktab udgør under 30-50%. Som helhed vurderes systemet kun at reducere flowet marginalt, og kun i de relativt kortvarige perioder med meget store flow (>15-20 m³/t) vil tryktabet virke svagt dæmpende på flowet. Denne dæmpende effekt ved store flow vurderes også at være årsagen til, at det gennemsnitlige flow fra et meget langt filter (15 m) relativt til et standardfilter, der er filtersat over en kortere strækning (5 m), ikke er ca. 300% men kun ca. 200% større. På lokaliteter som denne med meget store flow og en meget tyk umættet zone, bør det derfor overvejes at anvende 3" eller 4" filtre, hvis der kun ønskes ét filter i hver boring.

For lokaliteten i Fakse, er det gennemsnitlige luftflow fra de enkelte filtre generelt meget lavere end i Askov, og tryktabet i de enkelte filtre og rørføringer frem til det fælles manifold er minimalt. Den største enkeltmodstand i det samlede system vurderes at være selve manifolden, hvor der vil forekomme en del turbulens under de største flow. Da det gennemsnitlige flow fra det samlede system (9 filtre) kun er ca. 1,6 m³/t, vil tryktabet dog være minimalt. Med de registrerede flow, vurderes det anvendte design at virke tilfredsstillende. På lokaliteter, hvor det naturlige flow er væsentligt højere, bør det overvejes evt. at opdele systemet i flere delsystemer med hvert sit kulfilter, eller alternativt at øge dimensioner på rør og manifold, således at et uønsket stort tryktab undgås.

6.1.3 System med mini vakuum pumpe

På lokaliteten i Fakse er der på en enkelt boring filtersat i kalken monteret en mini-vakuumpumpe drevet af strøm fra et 100W solcellepanel og en 285 W vindgenerator (mini-vindmølle). Fakse kommune har givet en midlertidig tilladelse til opstilling af den ca. 7 m høje mast, hvorpå solcellepanel og vindgenerator er monteret, se figur 4.5. Teknisk set har systemet kørt tilfredsstillende, og har kun været ude af drift i en kort periode på grund af en teknisk fejl i et laderelæ. Solcellerne har indladet ca. 80% af de totalt 6000Ah indladet på batterierne. Kun i de mørkeste vintermåneder indlader vindgeneratoren nogenlunde samme effekt som solcellerne. Vindgeneratoren har generelt indladet mindre effekt på batterierne end forventet, og årsagen hertil er sandsynligvis, at meget højere bygninger på nabogrunden medfører en vis læpåvirkning og øget turbulens. Der har været strøm nok på batterierne til at vakuumpumpen har været i drift ca. 50% af måleperioden, og den har i gennemsnit ydet ca. $1 \text{ m}^3/\text{t}$ i drift. Da det naturlige passive flow fra filtret er meget lavt ($<0,1 \text{ m}^3/\text{t}$), er det totale flow – og dermed også massefjernelsen fra dette filter – totalt domineret af ydelsen fra vakuumpumpen.

Ved fremtidige systemer i bebyggede områder bør der primært anvendes solcelle- paneler, idet de både er mere cost-effektive i forhold til vindgeneratoren, og samtidig er nemmere at placere, uden at de generer naboer visuelt. Med den anvendte type af pumpe med en maksimal ydelse på ca. $1 \text{ m}^3/\text{t}$, vil det primært være interessant at anvende dem, hvor det naturlige passive flow er lavt og permeabiliteten høj. I sådanne situationer vil det være muligt at opretholde et lavt flow igennem en lang driftsperiode (>2 år), men til en relativt lav pris for både anlæg og drift. Siden implementeringen af systemet i Fakse, er der udviklet en speciel model af vakuumpumpen, der kan kobles direkte til et solcellepanel, hvorved der opnås en markant besparelse, da laderelæer mv. kan udelades. En sådan pumpe, inklusive 1 stk. 100W solcellepanel, vurderes at kunne købes for ca. kr. 20.000 (januar 2002 prisniveau og dollarkurs).

6.2 Drift og monitorering

I det følgende vurderes de indhøstede driftserfaringer fra den 2-årige måleperiode, og der præsenteres et paradigme for, hvordan monitoreringen af fremtidige anlæg kan udføres og dokumenteres.

6.2.1 Funktionskontrol af anlæg

For prototype-systemerne i Allerød har der været udført funktionskontrol i forbindelse med de enkelte monteringsrunder, dvs. 3-4 gange om året. Ved denne kontrol er kulfiltret demonteret og undersøgt for tæring og en-vejs-ventilen er taget ud af bunden af filtret og kontrolleret. Evt. vand i brønden er registreret, og årsagen hertil søgt klarlagt og fejlen udbedret. Endelig er den afkastede poreluft fra svanehalen screenet for flygtige forbindelser, herunder PCE, ved hjælp af en PID-måler. Set i lyset af det aftagende luftflow, observeret hen igennem måleperioden, burde dybden til vandspejlet i boringerne have været målt manuelt noget hyppigere.

For systemet i Fakse, er der gennemført en kontrol som beskrevet for prototype systemerne i Allerød. Der er dog herudover, med 1-2 måneders

interval, foretaget en kontrol af det aktive system. Denne kontrol har omfattet aflæsning af timetællere for indladet effekt fra solceller og vindgenerator, samt kontrol af laderegulator og anden elektronik. Endvidere er syreindholdet og batteriernes tilstand i øvrigt kontrolleret én gang årligt.

For systemet i Askov, hvor poreluften ikke renses inden afkast til atmosfæren, er der udført funktionskontrol i forbindelse med de enkelte monteringsrunder, dvs. 3-4 gange om året. Ved denne kontrol er en-vejs-ventilen kontrolleret. Evt. vand i brøndene er registreret, og årsagen hertil søgt klarlagt og fejlen udbedret. Ved den fortsatte drift bør det med mellemrum også kontrolleres, at der ikke sker en tilpropning af de rør, som er ført op over taget, fx ved at fugle bygger reder.

Sammenfattende vurderes det, at de anvendte anlægskomponenter til prototype-systemet er særdeles robuste og kun kræver minimal vedligeholdelse. Det vil således i de fleste tilfælde være tilstrækkeligt at gennemføre en funktionskontrol med 1-2 års mellemrum. I de tilfælde, hvor der kan forventes et gennembrud på kulfiltrene indenfor 1 års drift, kan frekvensen afpasses i forhold hertil. Der kan da evt. hyppigere udføres en begrænset kontrol alene for gennembrud på kulfiltrene.

For anlæg, hvor der indgår egentlige mekaniske komponenter og elektronik, vil der være behov for en hyppigere funktionskontrol for at sikre en kontinuert drift. Dette vil have en væsentlig betydning for driftsomkostningerne i forhold til de helt passive systemer uden elektronik mv.

6.2.2 Løbende måling af nøgleparametre

De primære nøgleparametre til vurdering af effekten af passiv ventilation er størrelsen af luftflow og differenstryk, samt koncentrationen i den afkastede poreluft. Herudover kan koncentrationen i underliggende grundvandsmagasiner være interessant at følge.

Da en udstrømningsperiode for en passivt ventilerende boring er afhængig af et fald i atmosfæretrykket af en vis størrelse og varighed, er det forbundet med en række problemer at planlægge en målekampagne. Oftest vil det være nødvendigt at tage stilling fra dag til dag, da vejrprognoserne for atmosfæretrykket ikke er pålidelige udover 12-24 t. I forbindelse med dette projekt har der været en del forgæves forsøg på at gennemføre målerunder, og dette har været specielt udtalt i sommerperioderne, hvor atmosfæretrykket ikke varierer nær så meget som i vinterhalvåret. Der er dog en del forskel på lokaliteterne på grund af de geologiske forhold, og det har i Askov ikke været nær så svært at gennemføre målerunderne som i Fakse, hvilket skyldes, at differenstrykket hurtigere udlignes (og derved forsvinder luftflowet) på grund af det tyndere dæklag i Fakse.

Koncentrationen af PCE, TCE og TCA i den udstrømmende poreluft har i dette projekt været gennemført ved hjælp af en Innova 1312A gasmåler, der har vist sig at være et robust og stabilt instrument. Det vil dog i de fleste tilfælde være tilstrækkeligt at anvende en PID-måler til kontrol af forureningsniveauet i poreluften under selve prøvetagningen. Dette kræver naturligvis, at der ved de indledende undersøgelser er skabt klarhed over forureningssammensætningen. En egentlig kvantitativ analyse udføres med det nuværende prisniveau for analyser, mest økonomisk ved at opsamle en luftprøve på kulrør, der herefter analyseres på et akkrediteret laboratorium.

Under en udstrømningsperiode for poreluft, kan størrelsen af luftflowet måles med et simpelt håndinstrument til måling af lufthastighed. I dette projekt har der været anvendt et instrument af fabrikatet TSI. Efter lufthastigheden er målt, afblændes boringen med en prop med en målestuds, hvortil der tilsluttes en differenstrykmåler. Efter at trykket har stabiliseret sig, hvilket oftest sker indenfor 1-20 sek., aflæses størrelsen af differenstrykket. På baggrund af disse to parametre kan boringens specifikke ydelse beregnes, og det kan vurderes, om der over en årrække sker en ændring. Dette er, som nævnt i afsnit 5.3 og 5.4, observeret i Allerød, og vil have betydning for effektiviteten af systemet, da et aftagende luftflow vil medføre en aftagende massefjernelse.

Som beskrevet i afsnit 2.3, er det muligt at beregne størrelsen af luftflowet fra en passivt ventilerende boring ud fra en historisk tidsserie for atmosfæretryk. Dette kræver dog, at der er gennemført et minimalt pilotforsøg, hvor både luftflow og differenstryk er målt over en kort periode, således at permeabiliteten af både dæklag og den umættede zone kendes. Da dette normalt vil være tilfældet, vurderes det at være tilstrækkeligt at beregne det årlige flow ud fra en tidsserie for atmosfæretryk, der fx kan rekvireres fra DMI. Herved undgås det at skulle montere elektroniske flowmålere som anvendt i dette projekt, og omkostningerne til monitorering kan reduceres væsentligt.

Alternativt til at måle, mens luften naturligt strømmer ud af boringen, kan der prøvetages ved at anvende en elektrisk vakuumpumpe, som kobles direkte til den ønskede boring. Det må anbefales at køre med et lavt flow på fx 1 m³/t, og kun pumpe i ca. 10-15 min. Under hele forløbet registreres PID-niveauet i poreluften, og efter ca. 10 min., eller når PID-niveauet er stabilt, opsamles en prøve på kulrør. Ved at have udstyr med til at gennemføre denne procedure, kan en planlagt målekampagne altid gennemføres.

Til yderligere kontrol af den fjernede mængde forureningskomponenter, bør der udtages og analyseres blandeprøver af kulmaterialet fra de enkelte GAC-enheder, efterhånden som de udskiftes. Selvom der evt. har været gennembrud på filtret, kan der estimeres en minimumsmængde fjernet i perioden.

6.2.3 Eksempel på drifts- og monitoringsinstruks

Baseret på erfaringerne, opnået gennem dette projekt, er der udarbejdet en drifts- og monitoringsinstruks for lokaliteten i Allerød. Dette paradigma kan anvendes på andre lokaliteter, og indeholder de nødvendige skemaer til dokumentation af de relevante nøgleparametre, diskuteret i det tidligere afsnit. Ved udskiftning af GAC-enhederne er det erfaret, at det kan være nødvendigt med en trefod til at løfte enhederne ud af brøndene.

6.3 Opnåede oprensningseffekter på de 4 lokaliteter

I det følgende vurderes de indhøstede måleresultater fra den 2-årige måleperiode, og resultaterne fra de enkelte lokaliteter sammenlignes.

6.3.1 Poreluft-volumen afkastet

For de 4 lokaliteter er de vigtigste nøgletal for luftflowet anført i tabel 6.1. Der er ikke medtaget data fra kalken på Nygade i Fakse, da der her kun er to filtre,

hvoraf luftflowet fra det ene er domineret af den aktive pumpe og således ikke repræsenterer det naturlige passive flow.

	Enhed	Møllevej 12	Nygade 37 ¹⁾	Prins Valdemars Alle 14	Amtsvej 2-4
		Askov	Fakse	Allerød	Allerød
Tykkelse af umættet zone	(m)	20	3	2,5	2,5
Middel luftflow for enkelt filter	(m ³ /t)	2,2	0,2	0,42	0,49
Middelflow for samlet system	(m ³ /t)	23,7	1,6	2,1	2,95
Maksimalt flow for samlet system	(m ³ /t)	261	40	33,5	43,7
Maksimalt/minimalt differenstryk	(mBar)	+11/-10	6,4/-8,2	+11/-11	+11/-11
Samlet poreluft-volumen afkastet	(m ³)	415.224	28.032	36.792	51.684
Antal poreluftvolumen udskiftninger på 2 år	(-)	23	58	58	107

¹⁾ Kun data for borerne i sandlaget

Tabel 6.1

Sammenfatning af borerne's ydelse og antallet af poreluftvolumen udskiftninger på de enkelte lokaliteter.

Det gennemsnitlige luftflow fra et enkelt filter på Møllevej er ca. 5-10 gange større end for de øvrige lokaliteter, jf. tabel 6.1 Dette skyldes dels, at filtersætningen her er 5 m lang, mens den kun er 2-3 m lang på de øvrige lokaliteter, og dels at permeabiliteten og det gennemsnitlige differenstryk er lidt større. På Møllevej er den umættede zone generelt filtersat i to dybdeintervaller med 5 m lange filtre, og det er således kun halvdelen af den samlede tykkelse af den umættede zone, der er filtersat. For de øvrige lokaliteter er den fulde umættede zone filtersat. For lokaliteten på Møllevej kunne der således opnås et væsentlige større flow, såfremt filtrene dækkede hele den umættede zones tykkelse. Årsagen til at dette ikke blev implementeret fra starten af var, at de højeste poreluftkoncentrationer blev påvist i de øverste 10 m af den umættede zone, og at en vis del af den udstrømmende poreluft også forventedes at komme fra den dybere zone, der ikke er filtersat.

Det maksimale øjeblikkelige luftflow fra de samlede systemer er op til ca. 260 m³/t på Møllevej, mens det er ca. 6-7 gange lavere på de øvrige lokaliteter, jf. tabel 6.1. Dette afspejler igen forskellen i permeabiliteten samt størrelsen af det maksimale differenstryk. Det samlede luftvolumen, afkastet i den 2-årige måleperiode (2000-2001), er størst på Møllevej med næsten 0,5 mill. m³ poreluft, mens det er ca. 8-15 gange lavere på de øvrige lokaliteter. Differenstrykket er positivt i ca. 50% af tiden, og udstrømning fra filtrene sker i ca. 40-50% af tiden. Når der ikke registreres udstrømning i 50% af tiden (svarende til positivt differenstryk), skyldes det dels, at de mindste flow ikke kan måles med de elektroniske flowmålere, samt at de korteste flowhændelser (<2t) er skåret væk af hensyn til databehandlingen.

For at kunne forklare evt. forskelle i massefjernelse og reduktion af poreluftens koncentration af PCE, er det nødvendigt at beregne antallet af poreluftvolumener, der er blevet udskiftet i måleperioden, jf. tabel 6.1 Til denne beregning er anvendt et forurenede poreluftvolumen, svarende til den fulde tykkelse af den umættede zone, og en horisontal afgrænsning, svarende til 1-15 mg PCE/m³ konturen for den oprindelige forureningsudbredelse. Antallet

af poreluftudskiftninger varierer mellem 23 og 107, med den mindste værdi for Møllevej. På Møllevej, hvor kun den øverste halvdel (2x5 m) af den umættede zoner er filtersat, er der ved beregningen antaget, at den fulde umættede zone på 20 m ventileres. Anvendes alene poreluft-volumenet for de øverste 10 m, bliver antallet af poreluftudskiftninger ca. 50.

Da den horisontale lufthastighed i stigende afstand fra en passivt ventilerende boring tilnærmelsesvis aftager lineært med afstanden til boringen, betyder det, at området nær ved en boring bliver ventileret af en meget større mængde luft end et område beliggende fjernere fra boringen. For en cylinder med en radius på hhv. 1, 5 og 10 m omkring en boring med to filtre á 5 m på Møllevej og en højde svarende til hele den umættede zone på 20 m, kan antallet af poreluftudskiftninger beregnes til 4000, 165 og 40. Det er således generelt vanskeligt at finde et simpelt mål for, hvordan effektiviteten af ventilation (både aktiv og passivt) kan udtrykkes.

6.3.2 PCE-masse fjernet fra den umættede zone

For de 4 lokaliteter er de vigtigste nøgletal for PCE-fjernelsen anført i tabel 6.2. Der er ikke medtaget data fra kalken på Nygade i Fakse, idet der ikke foreligger tilstrækkelige data for denne zone til at der kan opstilles en massebalance for både stof (PCE) og vand.

	Enhed	Møllevej 12	Nygade 37 ¹⁾	Prins Valdemars Alle 14	Amtsvej 2-4
		Askov	Fakse	Allerød	Allerød
PCE mængde fjernet	(kg)	50-60	2-3	5-6	8-9
Skønnet årlig fjernelsesrate efter 2-4 års drift	(kg/år)	1	0,1	1	1
Skønnet årlig tilførsel af PCE til umættet zone	(kg/år)	1	0,1	0,1-1	0,1-1

¹⁾ Kun data for borerne i sandlaget

Tabel 6.2

Sammenfatning af den samlede PCE-fjernelse og generel massebalance for de enkelte lokaliteter.

Den samlede mængde PCE, fjernet fra den umættede zone, varierer fra 2-3 kg på Nygade og op til 50-60 kg på Møllevej, jf. tabel 6.2. For alle lokaliteterne illustrerer dette, at der over tid kan akkumuleres væsentlige mængder PCE i den umættede zone, og at denne masse udgør en potentiel og langvarig kilde til forurening af det underliggende grundvand. Koncentrationen i poreluften er generelt reduceret på alle lokaliteterne efter 2 års drift, og dermed også massen af PCE i den umættede zone. Dette betyder, at fjernelsesraten i løbet af denne periode også er aftagende, og på baggrund af den observerede udvikling i de første 2 år er udviklingen i de næste par år skønnet, jf. tabel 6.2. Denne fjernelsesrate kan sammenlignes med den årlige tilførsel af stof fra den overliggende moræner, der blev estimeret for de enkelte lokaliteter i afsnit 4. Som det fremgår af tallene, vurderes den fremtidige årlige fjernelsesrate at være i samme størrelsesorden som den årlige tilførsel til den umættede zone. For alle lokaliteter ligger begge størrelser mellem 0,1 og 1 kg PCE/år, og dette interval vurderes at være et godt estimat for kildestyrken.

For de to filtre placeret i kalken på Nygade, er der i alt opsamlet ca. 0,28 kg PCE, hvilket indikerer, at der er sket et vist gennembrud af PCE til kalken. På

grund af kalkens specielle dobbelt-porøse karakter, er det vanskeligt ud fra de få data at vurdere forureningsspredningen i kalken yderligere. Det kan dog konstateres, at det også fra kalken er muligt at fjerne en vis stofmængde ved ventilation, selvom det største luftflow er genereret af den lille vakuumpumpe, der er drevet af solceller/vindmøllen.

6.3.3 Ændringer i poreluftforureningens styrke og udbredelse

For de 4 lokaliteter er de vigtigste nøgletal for reduktionen i koncentrationen af PCE i poreluften anført i tabel 6.3. Der henvises til afsnit 5 for nærmere diskussion vedrørende beregningen af gennemsnit mv. Da koncentrationsudviklingen i de enkelte filtre generelt bedst beskrives ved et eksponentielt henfald, kan der beregnes en halveringstid for hvert filter. Denne tid udtrykker således, hvor mange måneders drift, der skal til for at halvere en givet udgangskoncentration. I tabel 6.3 er anført den gennemsnitlige halveringstid for de 4 lokaliteter. Der er i tabellen ikke medtaget data fra kalken på Nygade i Fakse, idet reduktionen her primært skyldes driften af den aktive vakuumpumpe, og således ikke repræsenterer det naturlige passive luftflow.

	Enhed	Møllevej 12	Nygade 37 ¹⁾	Prins Valde- mars Alle 14	Amtsvej 2-4
		Askov	Fakse	Allerød	Allerød
Største koncen- tration i et enkelt filter ved start	(mg-PCE/m ³)	730	195	730	320
Start koncentration (gennemsnit)	(mg-PCE/m ³)	230	83	338	242
Slut koncentration (gennemsnit)	(mg-PCE/m ³)	32	33	119	90
Reduktion i løbet af ca. 18 mdr.	(%)	84	58	74	63
Halveringstid for PCE koncentration	(mdr.)	7	17	28	17

¹⁾ Kun data for borerne i sandlaget

Tabel 6.3

Sammenfatning af den relative reduktion i koncentrationen og halveringstiden for PCE-koncentrationen i poreluften for de enkelte lokaliteter.

Der er i enkelte filtre registreret startkoncentrationer på op til ca. 750 g PCE/m³ på to af lokaliteterne. Det gennemsnitlige koncentrationsniveau ved start ligger mellem ca. 80 og 340 mg/m³, og specielt på Nygade er koncentrationsniveauet generelt lavere end på de øvrige lokaliteter.

Betragtes den relative procentvise reduktion i PCE-koncentrationen, skiller Møllevej sig ud, idet den gennemsnitlige reduktion her er på 84%. Halveringstiden for koncentrationen er ca. 7 mdr., hvilket er den mindste halveringstid for de 4 lokaliteter. Den laveste relative reduktion ses på Nygade (58%), men her var startkoncentrationerne også relativt lave i forhold til de øvrige. Halveringstiden er her 17 mdr., og således væsentlig længere end for Møllevej. De to lokaliteter i Allerød udviser en relativ ensartet procentvis reduktion på 70% i PCE-koncentrationen, mens halveringstiden for koncentrationen varierer fra 17 til 28 mdr.

Intuitivt forventes det, at koncentrationen vil reduceres mere med et stigende antal porevolumenudskiftninger. Sammenholdes den gennemsnitlige

procentvis reduktion (tabel 6.3) med antallet af porevolumener udskiftet (tabel 6.1), ses, at den største reduktion (85%) opnås på Møllevvej, hvor der samtidig er udskiftet det laveste antal porevolumener (27 porevolumener). Der er således ikke nogen simpel sammenhæng mellem de to parametre i de konkrete sager, og med den specifikke metode, hvorpå parametrene er beregnet.

Efter ca. 18 mdr., er det gennemsnitlige koncentrationsniveau reduceret til ca. 30 mg PCE/m³ på Møllevvej og Nygade, mens koncentrationsniveauet på de to øvrige lokaliteter i Allerød (Prins Valdemars Alle og Amtsvej) kun er reduceret til ca. 100 mg PCE/m³. Årsagen til at niveauet på de to lokaliteter i Allerød ikke er reduceret i samme grad som på de to andre lokaliteter, vurderes primært at skyldes en ikke helt optimal placering af de passivt ventilerende borer. Således ligger det egentlige hot-spot på Prins Valdemars Alle sandsynligvis under selve ejendommen, hvorved borerne kun omkranser det kraftigt forurenede område, i stedet for at stå centralt i midten af det. Tilsvarende findes der sandsynligvis også et hot-spot område lige nord for borerne på Amtsvej, men igen er adgangsforholdene vanskelige, idet der er en nedkørsel til en P-kælder.

Med de beregnede halveringstider, kan det gennemsnitlige koncentrationsniveau teoretisk reduceres til ca. 10 mg/m³ efter yderligere ca. 1 års drift på Møllevvej, mens der vil gå ca. 2-3 år på Nygade. På lokaliteterne i Allerød vil der gå yderligere 4-6 år, såfremt grundvandsstanden igen aftager. Om dette reelt vil kunne opnås, er usikkert, og kræver, at kildestyrken på de 4 lokaliteter viser sig at være omkring det laveste estimat på ca. 0,1 kg-PCE/år eller mindre.

Udbredelsen af den oprindelige poreluftforurening er tydeligt påvirket af de passivt ventilerende borer. I områderne med de meget høje startkoncentrationer er der sket en kraftig reduktion i de maksimale koncentrationer, samtidig med at nogen af konturlinierne for de lavere koncentrationer er blevet trukket ind mod borerne. I borerne, placeret i udkanten af forureningen i den umættede zone og dermed med de laveste startkoncentrationer, ses generelt ikke nogen signifikant ændring i koncentrationsniveauet. I enkelte borer er der tegn på stigende koncentrationer som følge af, at de trækker forurenede poreluft til fra et kraftigere forurenede område, hvor der ikke er placeret filtre. Sammenfattende vurderes det, at der på alle lokaliteter nu er kontrol med den naturlige horisontalspredning ved diffusion, som oprindeligt var årsag til den relativt store horisontale spredning. På sigt vil poreluftforureningen som helhed aftage yderligere i udbredelse og styrke, under forudsætning af at det naturlige flow kan opretholdes.

I filtrene lokaliseret i kalken på Nygade reduceres koncentrationsniveauet i gennemsnit fra ca. 22 til 12 mg PCE/m³. Det vurderes således at være muligt at reducere koncentrationsniveauet ved hjælp af passiv ventilation, men det er vanskeligt at forudsige den fremtidige koncentrationsudvikling på grund af kalkens dobbelt-porøse natur og de få målepunkter.

6.3.4 Ændringer i grundvandskoncentrationer

På tre af lokaliteterne er der udtaget grundvandsprøver fra filtre placeret i umiddelbar nærhed af, eller direkte under de passivt ventilerende borer. Formålet har været at kunne påvise en evt. aftagende koncentration i

vandfasen som følge af en reduktion i poreluftkoncentrationen, og dermed massefluksen til grundvandszonen.

På lokaliteten Møllevej er der observeret en aftagende trend i alle 3 filtre, men på grund af den naturlige variation i måling af grundvandskoncentrationer er det for tidligt på det nuværende tidspunkt at kunne konkludere noget med sikkerhed. Det vurderes dog overvejende sandsynligt, at de aftagende koncentrationer skyldes en reduktion i massefluksen til grundvandet, forårsaget af de passivt ventilerende borer. Specielt i grundvandsfiltret i den passivt ventilerende boring PV1 ses en reduktion i PCE-indholdet fra ca. 300 µg/l til ca. 20 µg/l. Kun fortsat monitoring over en årrække kan afgøre, hvor meget koncentrationen i grundvandet permanent kan reduceres.

På lokaliteten Prins Valdemars Alle observeres i et enkelt filter et markant fald i PCE-koncentrationen fra ca. 1000 til ca. 200 µg/l i løbet af de første 18 mdr. Denne effekt vurderes at være forårsaget af en reduktion i massefluksen som følge af de aftagende PCE-koncentrationer i poreluften. Koncentrationen stiger herefter igen til nær udgangsniveauet, hvilket er sammenfaldende med, at grundvandsstanden er steget ca. 1,5 m, hvorved den umættede zone stort set er væk, og luftflowet fra borerne stærkt reduceret eller helt ophørt.

På lokaliteten Amtsvej er der i et enkelt filter konstateret et stigende indhold af PCE, men placeringen af filtret i forhold til den oprindelige grundvandsfane samt den generelt stigende grundvandsstand og reduktion i luftflowet betyder, at det ikke er muligt at vurdere effekten af den passive ventilation separat.

6.3.5 Boringsafstande og realiserede luftflow i forhold til designet

I det oprindelige design var der alene specificeret en maksimal afstand, hvormed borerne skulle søges placeret, givet de fysiske forhold på lokaliteterne. Denne afstand var endvidere skønnet ud fra den forventede størrelse af det gennemsnitlige luftflow, bestemt ud fra de indledende pilotforsøg. I tabel 6.4 er sammenfattet de under projektering forventede og de under udførelsen realiserede værdier for boringsafstand og gennemsnitligt luftflow for de enkelte lokaliteter.

	Enhed	Møllevej 12	Nygade 37 ¹⁾	Prins Valdemars Alle 14	Amtsvej 2-4
		Askov	Fakse	Allerød	Allerød
Oprindelig skønnet nødvendig boringsafstand	(m)	10-15	10-15	10-15	10-15
Realiseret boringsafstand	(m)	14-20	7-10	12-18	12-14
Oprindeligt skønnet nødvendigt middel-flow pr. filter	(m ³ /t)	0,5-1	0,5-1	0,5-1	0,5-1
Realiseret middel-flow pr. filter	(m ³ /t)	2,2	0,2	0,42	0,49

¹⁾ Kun data for borerne i sandlaget

Tabel 6.4
Sammenfatning af den forventede og realiserede boringsafstand samt gennemsnitligt luftflow for de enkelte lokaliteter.

Den realiserede boringsafstand på Møllevej er generelt i den høje ende af, hvad der var forventet, mens det omvendte er tilfældet på Nygade. Til

gengæld er de observerede middelflow større på Møllevej, mens de er mindre på Nygade. På de to sidste lokaliteter er de realiserede afstande og luftflow ikke væsentligt forskellige fra de forventede. Forskellen i de forventede og realiserede afstande vurderes at afspejle det forhold, at flere af lokaliteterne var bebyggede. I sådanne situationer viser det sig ofte under projekteringen, at der er uforudsete kabler og andre underjordiske installationer, som begrænser mulighederne for boringsplaceringer. De forventede luftflow kan på basis af metoderne, gennemgået tidligere, forudsiges mere præcist end oprindeligt gjort her.

6.3.6 Vurdering af influensradius og strømningsforhold generelt

Begrebet "Influensradius" for en normal aktiv ventilationsboring med konstant flow er ikke nogen entydig størrelse, og er defineret på mange forskellige måder i litteraturen. For en passivt ventilerende boring med det karakteristiske pulserende luftflow kan de gængse definitioner ikke umiddelbart anvendes. Den oprindelige idé med at ventilere den umættede zone med et naturligt lavt og pulserende flow var, at der herved i perioder kunne fordampes og fjernes stof fra porevandet, inden dette ved advektion med porevandet nåede igennem den umættede zone til grundvandet. Som det fremgår af tabel 6.5, er der således registreret ca. 330-390 udstrømningsperioder over den to-årige måleperiode, med en gennemsnitlig varighed på mellem 13 og 25 timer. I gennemsnit sker der udstrømning af poreluft i ca. 40-50% af tiden.

Denne problemstilling er kompliceret at regne på, men i anden sammenhæng er det ved hjælp af en multifase model (A-T2VOC) og en geologisk og forurenings-mæssig situation samt luftflow som på Møllevej vist, at det er muligt ved passiv ventilation at reducere massefluxen af PCE gennem den umættede zone med flere størrelsesordener /ref. 21/. Modelberegningerne viste også, at poreluft-koncentrationen i den umættede zone meget hurtigt blev reduceret i både styrke og udbredelse. På projektlokaliteterne ses også samme trend, og sammen med den forsigtigt aftagende tendens for grundvandskoncentrationerne vurderes det, at massefluxen til grundvandet er blevet reduceret. Det er imidlertid ikke muligt at kvantificere denne reduktion direkte ud fra målingerne.

Det oprindelige formål med metoden, som den er blevet anvendt i USA, har været at fjerne en vilkårlig stofmængde fra et system, som enten naturligt eller efter aktiv ventilation har lave koncentrationer og udviser en diffusions begrænset fjernelsesrate. Dette har også været formålet med metoden anvendt på de 4 projektlokaliteter, men de faktiske udgangskoncentrationer har været meget højere end hvad der har været prøvet i USA. Alligevel ser det ud til at det naturlige flow er i stand til også at fjerne de højeste koncentrationer, og det bliver interessant at se, hvilket niveau der kan nås ned på efter yderligere 1-5 års drift.

En måde at definere "influensradius" på kunne være den afstand, hvorfra en boring opsamler poreluft under en "gennemsnitlig" udstrømningshændelse. Som tidligere gennemgået i afsnit 5, kan der laves statistik på disse udstrømningshændelser, og i tabel 6.5 er der for hver lokalitet anført det gennemsnitlige og maksimale luftvolumen afkastet under hele måleperioden. Udfra dette volumen samt tykkelsen af den umættede zone kan afstanden, hvorfra luften indfanges beregnes.

	Enhed	Møllevej 12	Nygade 37 ¹⁾	Prins Valdemars Alle 14	Amtsvej 2-4
		Askov	Fakse	Allerød	Allerød
Antal udstrømningsperioder over 2 år	-	382	399	333	333
Gennemsnitlig varighed af udstrømningsperiode	(timer)	16	13	25	25
Gennemsnitligt luftvolumen afkastet pr. udstrømningsperiode	(m ³)	60	3,9	35	35
Horisontal afstand hvorfra luften strømmer til for et gennemsnits-luftvolumen afkastet	(m)	3,6	1	3,9	3,9
Maksimalt luftvolumen afkastet under en enkelt udstrømningsperiode	(m ³)	594	25	249	249
Horisontal afstand hvorfra luften strømmer til for det maksimale luftvolumen afkastet	(m)	10	3	10	10
Maksimal horisontal transportafstand dokumenteret ved tracer-test	(m)	>12	>2	Ikke målt	Ikke målt

¹⁾ Kun data for borerne i sandlaget

Tabel 6.5

Sammenfatning af transportafstande hvorfra borerne opsamler poreluft under forskellige scenarier for de enkelte lokaliteter.

Det gennemsnitligt afkastede volumen er størst på Møllevej og mindst på Nygade. De tilhørende værdier for influensradius er 3-4 m for Møllevej og de to lokaliteter i Allerød, mens influensradius for Nygade kun er ca. 1 m. Den i praksis største værdi for influensradius ved denne beregningsmetode fås, hvis der anvendes det maksimale luftvolumen registreret under en enkelt udstrømningsperiode. For alle lokaliteter er dette volumen ca. 4 gange så stort som det gennemsnitlige luftvolumen, og den beregnede influensradius bliver nu ca. 10 m for Møllevej og de to lokaliteter i Allerød, mens den for Nygade kun bliver ca. 3 m, jf. tabel 6.5

Resultatet af det gennemførte tracerforsøg på Møllevej indikerer, at poreluften under en konkret udstrømningshændelse bliver transporteret til en passivt ventilerende boring fra et injektionspunkt i ca. 12 m's afstand, jf. tabel 6.5. Tilsvarende blev der på Nygade påvist transport af tracergas fra et injektionspunkt i en afstand af mere end 2 m fra den passivt ventilerende boring.

Estimaterne af influensradius kan sammenlignes med den faktiske *halve* afstand mellem borerne (den halve afstand idet borerne forudsættes at have ens luftflow, jf. tabel 6.4), for at vurdere, om den realiserede boringstæthed er tilstrækkelig. På alle lokaliteter er den realiserede boringsafstand ca. dobbelt så stor som den teoretiske influensradius, og lidt større eller sammenlignelig med den maksimale influensradius.

6.4 Dimensionering af fremtidige anlæg til passiv ventilation

6.4.1 Hydrogeologiske forhold

For at passiv ventilation kan implementeres, kræves det, at en række specifikke hydrogeologiske forhold er til stede. For det første skal der være et eller flere lavpermeable dæklag over den umættede lagserie, som man ønsker at ventilere. Det er dette lag, der skal dæmpe trykudbredelsens størrelse og hastighed så meget, at der i perioder kan opbygges en trykforskel mellem atmosfæren og den umættede lagserie. Dette dæklag vil ofte kunne udgøres af et moræneler eller en anden type lavpermeabelt materiale. Den nødvendige tykkelse af dette lag varierer med permeabiliteten af dæklaget, og vil for typisk moræneler være ca. 3-5 m, mens et lag på kun ca. 0,5 m af en fed smeltevandsler vil kunne have samme effekt. Sådanne dæklag findes over store dele af Danmark, og den forudsætning kan således opfyldes på en lang række forurenede lokaliteter over hele landet.

Udover dæklaget, skal der herunder findes en eller flere (som på Nygade) umættede zoner. Den effektive permeabilitet af disse zoner skal være så stor, at der ved de små differenstrøg på under 15 mBar kan genereres et luftflow. Dette vil typisk kræve en umættet zone af fint sand eller grovere materialer, eller opsprækket kalk med en høj sprækkepermeabilitet.

Såfremt ovenstående forhold er opfyldt, er de nødvendige forudsætninger for at der kan måles et naturligt luftflow til stede. Hvis der findes borer på lokaliteten eller i nærområdet, der er filtersat i den ønskede formation, kan forudsætningerne ofte verificeres ved at foretage simple indledende observationer af luftflow under et fald i atmosfæretrykket.

6.4.2 Forureningstyper og begrænsninger

Anvendelse af passiv ventilation som i dette projekt er begrænset til flygtige stoffer, hvilket omfatter gruppen af chlorerede opløsningsmidler samt den flygtigste fraktion af olie- og benzinprodukter. Også til det meget flygtige tilsætningsstof MTBE, som tilsættes benzin, kan metoden anvendes, se fx /22/.

Endelig kan methan og kuldioxyd fra lossepladser også bortventileres passivt under de rigtige hydrogeologiske forhold.

I forhold til de meget høje indledende koncentrationsniveauer på enkelte af projektlokaliteterne ($> 500 \text{ mg-PCE/m}^3$), må det fremover anbefales at indlede med en kort periode med aktiv ventilation fra en eller flere borer. Herved kan koncentrationsniveauet hurtigt bringes ned til et niveau, hvor det passive flow enten er i stand til at vedligeholde, eller nedbringe koncentrationen yderligere.

Ved at ensrette den naturlige luftstrøm ned i jorden, kan der tilføres atmosfærisk luft til den umættede zone. Da atmosfærisk luft indeholder ilt, kan en aerob nedbrydning af fx oliekomponenter stimuleres in-situ ved denne metode. Denne variant af metoden har endnu ikke været afprøvet i Danmark, men burde have en række potentielle anvendelser over for mindre forureninger fra fx villa olietanke.

6.4.3 Vurdering af boringsantal og -afstand

Efter at der er gennemført et pilot-forsøg, som beskrevet i afsnit 2.2, er de nødvendige parametre fastlagt, og det forventede årlige luftflow kan beregnes som tidligere beskrevet. Antallet af boringer afhænger af størrelsen af det område, som skal dækkes, og som udgangspunkt skal boringerne kun placeres indenfor de kraftigst forurenede områder, da de også vil trække luft ind fra udkanten af poreluftforureningen.

Ud fra erfaringerne fra projektlokaliteterne, kan der for en umættet zone med en tykkelse på op til ca. 5 m som tommelfingerregel regnes med en nødvendig boringsafstand på ca. 15 m, hvis det gennemsnitlige luftflow er stort, dvs. større end ca. 2 m³/t. For gennemsnitlige luftflow mellem 0,5 og 2 m³/t kan der anvendes en boringsafstand på ca. 10 m, mens der for gennemsnitlige luftflow mindre end 0,5 m³/t kan anvendes en boringsafstand på ca. 5 m.

7 Anlægs- og driftsøkonomi

Efter i de tidligere afsnit at have set på, hvordan anlæggene for passiv ventilation er designet og virker i praksis, vil der i dette afsnit blive givet et overslag på anlægs- og driftsomkostningerne ved etablering og drift af de anlægstyper, der er anvendt på de 3 lokaliteter i Allerød, Fakse og Askov.

På trods af, at passiv ventilation er en ny teknik, er anlæggene primært opbygget af standardkomponenter. Det forventes derfor ikke, at prisniveauet vil blive mindre i takt med at teknikken bliver mere udbredt. Overslagene er derfor udarbejdet med udgangspunkt i de omkostninger, der er realiseret på de 4 lokaliteter.

Der er imidlertid andre forhold, der kan påvirke prisniveauet. Det er eksempelvis almindelig konjunkturvariation, geografiske forskelle i prisniveau samt lokalitetsspecifikke forhold som eksempelvis adgangsforhold mv. Disse forhold er ikke diskuteret i det følgende.

7.1 Anlægsomkostninger

I dette afsnit er der udarbejdet en økonomisk oversigt over de realiserede anlægsomkostninger for anlæggene på hver af de 3 lokaliteter i hhv. Allerød (Prins Valdemars Allé og Amtsvej), Fakse (Nygade) og Askov (Møllevej). Omkostningerne er så vidt muligt angivet som enhedsomkostninger og totalomkostninger for de anvendte komponenter. Alle omkostninger er inkl. levering og etablering.

Afslutningsvis er der i afsnittet udarbejdet et groft overslag over projekteringsomkostningerne ved etablering af anlæggene for passiv ventilation.

7.1.1 Prins Valdemars Alle og Amtsvej, Allerød

Anlægget i Allerød fordelt på 2 ejendomme består som tidligere nævnt af 11(5+6 hhv.) filterboringer for passiv ventilation (PV-boring). Boringerne er ført til et sandlag ca. 15 meter under terræn (m u.t.) og filtersat over ca. 5 meter. Hver boring er monteret med et kulfilter og en-vejs-ventil (in-line ventil) placeret i en udluftningsbrønd, og afkast er ført til atmosfæren via en svanehals. Et system, der kan betegnes som et standard udluftningssystem for passiv ventilation, jf. afsnit 3.3.

I nedenstående tabel 7.1 er der udarbejdet en økonomisk oversigt over de realiserede anlægsomkostninger for anlægget i Allerød.

Komponent	Enhed for mængdeangivelse	Antal	Enhedsomkostning	Total omkostning Prisniveau 1999
PV-boring til 15 meter, inkl. 5 meter filter og afpropning til terræn, excl. prøvetagning	stk.	11	20.000,-	220.000,-
In-line ventil	stk.	11	300,-	3.300,-
Kulfilter inkl. overgangs-/moniteringsstykke	stk.	11	6.000,-	66.000,-
Udluftningsbrønde, ø425 mm excl. kulfilter incl. svanehals	stk.	11	10.000,-	110.000,-
Udluftningsrør pr. meter (Afhængig af lægningsdybden)	meter	30	400,-	12.000,-
Anlægsomkostninger i alt				~410.000,-

Tabel 7.1:
Realiserede omkostninger for etablering af PV-system i Allerød

For en typisk boring til passiv ventilation bestykket med kulfilter og udluftningsbrønd i Allerød løber omkostningen til installation således op i ca. 35-40.000 kr., excl. moms. Eksisterende boringer kan evt. konverteres til et standard udluftningssystem for passiv ventilation for ca. 15-20.000 kr. pr. boring, afhængig af filterdimension, adgangsforhold mv.

7.1.2 Nygade 37, Fakse

På Nygade 37 i Fakse er der etableret i alt 8 filterboringer for passiv ventilation. To af boringerne er ført til kalken ca. 20 m u.t. og filtersat over 4-6 meter. De resterende 6 boringer er ført til et sandlag ca. 12 m u.t. og filtersat over 3-5 meter. Alle boringer er monteret med in-line ventil. Den opstrømmende luft fra boringerne ledes via udluftningsrør gennem en moniteringsbrønd ved hver boring frem til en manifold, hvor luften fra boringerne samles for videre fremføring til en brønd monteret med kulfilter, jf. afsnit 4.4.4.

I en af boringerne er der installeret et mindre aktivt anlæg, hvor en lille 12V vakuumventilationspumpe supplerer det passive anlæg. Pumpen drives af strøm genereret med et enkelt solcellepanel kombineret med en mini-vindmølle, der leverer strøm til 2 stk. 12V akkumulatorer, der videre forsyner pumpen, jf. afsnit 4.4.

I nedenstående tabel 7.2 er der udarbejdet en økonomisk oversigt over de realiserede anlægsomkostninger for hhv. det passive og aktive anlæg i Fakse.

Komponent	Enhed for mængdeangivelse	Antal	Enhedsomkostning	Total omkostning Prisniveau 1999
Passivt anlæg				
PV-boring til ca. 12 meter, inkl. 3-5 meter filter og afpropning til terræn, excl. Prøvetagning	stk.	6	15.000,-	90.000,-
PV-boring til ca. 20 meter, inkl. 4-6 meter filter og afpropning til terræn, excl. Prøvetagning	stk.	2	30.000,-	60.000,-
En-vejsventil	stk.	10	300,-	3.300,-
Moniteringsbrønd, ø425 mm	stk.	8	5.000,-	40.000,-
Udluftningsrør pr. meter (Afhængig af lægningsdybden)	meter	110	300,-	33.000,-
Manifold	stk.	1	10.000,-	10.000,-
Brønd med kulfilter	stk.	1	25.000,-	25.000,-
Aktivt anlæg				
Solcellepanel, mini vindmølle, akkumulatorer og vakuumventilationspumpe	stk.	1	65.000,-	65.000,-
Anlægsomkostninger i alt				~325.000,-

Tabel 7.2:

Realiserede omkostninger for etablering af PV-system og aktivt system i Fakse

For en typisk boring til passiv ventilation i sandlaget, inklusive rørføringen frem til den centrale brønd med kulfilter, løber omkostningen til installation op i ca. 25.000 kr., excl. moms. Eksisterende boringer kan føres til et samlet afkast i en brønd med et centralt kulfilter, og den typiske udgift til selve brønden er 35-40.000 kr., excl. moms, afhængig af adgangsforhold og dimension. Det aktive system har kostet ca. 65.000 kr., excl. moms, i indkøb og montering.

7.1.3 Møllevej 12, Askov

På Møllevej 12 i Askov er der etableret 6 filtersatte boringer for passiv ventilation. Alle boringer er ført til ca. 20 m u.t. Fem af boringerne er filtersat separat i to niveauer over 5 meter fra ca. 7-12 m u.t. og 15-20 m u.t. I en enkelt af boringerne er der etableret et langt filter fra 6 til 20 m u.t.

Den udstrømmende luft fra filtrene i boringerne er samlet i et afkast placeret i siden af en udluftningsbrønd tilknyttet hver boring. In-line ventilerne er placeret i toppen af filtrene i udluftningsbrøndene. Den udstrømmende luft fra udluftningsbrøndene er ført til et samlet udluftningsrør, der er ført over taget på en eksisterende bygning, jf. afsnit 4.5.4.

I nedenstående tabel 7.3 er der udarbejdet en økonomisk oversigt over de realiserede anlægsomkostninger for anlægget i Askov.

Komponent	Enhed for mængdeangivelse	Antal	Enhedsomkostning	Total omkostning Prisniveau 1999
PV-boring til 20 meter, inkl. 5 meter filter og afpropning til terræn, excl. prøvetagning	stk.	6	20.000,-	120.000,-
En-vejsventil	stk.	11	300,-	3.300,-
Udluftsbrønde, ø600 mm	stk.	6	10.000,-	60.000,-
Udlufts rør og afkast over tag	stk.	1	5000,-	5.000,-
Anlægsomkostninger i alt				~190.000,-

Tabel 7.3:
Realiserede omkostninger for etablering af PV-system i Askov

For en typisk boring til passiv ventilation, incl. brønd og ledningsføring m.v., er omkostningerne ca. 30-35.000 kr., excl. moms.

7.1.4 Projekteringsomkostninger

Projekteringsomkostningerne er naturligvis betinget af lokale forhold som lokalitetens tilgængelighed og størrelse. Med udgangspunkt i de nuværende erfaringer vurderes et standardanlæg for passiv ventilation at kunne projekteres for mellem kr. 30.000,- og 60.000,-, excl. moms. Hertil kommer udgifter for tilsyn i anlægsfasen.

For fastlæggelse af teknikkens egnethed og designgrundlag for den enkelte lokalitet bør der forinden detailprojekteringen udføres en pilottest på en enkelt boring for passiv ventilation. Denne pilottest vurderes alt efter detaljeringsniveau at kunne udføres for mellem kr. 45.000,- og kr. 90.000,-, excl. moms samt inkl. leje af udstyr og afrapportering af test.

7.2 Driftsomkostninger

På baggrund af de erfaringer, der er indsamlet i forbindelse med den foreløbige drift og monitoring på de forskellige anlæg for passiv ventilation vurderes det, at drifts- og vedligeholdelsesomkostningerne på de 3 projektlokaliteter primært kan henføres til regelmæssige eftersyn af anlægskomponenternes funktion, rengøring af udluftsbrønde og kontrol af gennembrud i kulfiltre.

I det følgende er det forudsat, at der i driftsfasen foretages et årligt eftersyn, hvor anlægskomponenterne efterses for hærverk eller andre skader. Derudover forudsættes det, at drivtryk og flow samt koncentrationer af forureningskomponenter i udstrømningsluften måles. Derudover måles for gennembrud i kulfiltre, hvis de er monteret på anlæg.

I tilfælde af gennembrud i kulfiltre foretages en udskiftning. Hvor ofte, der skal udføres kulfilterskift, afhænger af forureningskoncentrationerne i udstrømningsluften og størrelsen af kulfiltrene.

I nedenstående overslag/estimat (tabel 7.4) over driftsomkostningerne forudsættes det, at der udføres driftseftersyn på et anlæg, svarende til anlægget i Allerød, hvor der er monteret separate kulfiltre ved hver boring. Det forudsættes derudover, at der udføres kulsift en gang om året i halvdelen af borerne.

Komponent	Enhed for mængdeangivelse	Antal	Enhedsomkostning	Total omkostning Prisniveau 1999
Kulsift	stk.	6	2.500,-	15.000,-
Leje måleudstyr mv.	stk.	1	10.000,-	10.000,-
Måle- og rapporteringsarbejde	stk.	1	20.000,-	20.000,-
Driftsomkostninger i alt				~45.000,-

Tabel 7.4:
Estimerede driftsomkostninger for drift af PV-system

7.3 Sammenfattende om anlægs- og driftsomkostninger

På baggrund af ovenstående gennemgang af anlægsomkostningerne for de 4 lokaliteter og de estimerede driftsomkostninger vurderes det, at et standardanlæg for passiv ventilation med 5-6 borer inkl. pilottest og projektering kan udføres for mellem kr. 250.000,- og 500.000,-, excl. moms.

Såfremt der på en lokalitet findes eksisterende borer, som kan konverteres til passiv ventilation, vil udgifterne kunne reduceres markant. Dette vil oftest være tilfældet i sager, hvor der tidligere har været drevet aktiv ventilation, men hvor massefjernelsesraten indikerer, at systemet har nået en diffusionsbegrænset tilstand.

De årlige driftsomkostninger estimeres at variere mellem kr. 30.000,- og 60.000,-, excl. moms. Over tid må omkostningerne forventes at blive mindre.

8 Referencer

- /Ref. 1/: Luftvejledningen, nr. 2, 2001. Begrænsning af luftforurening fra virksomheder. Miljø- og Energiministeriet Miljøstyrelsen.
- /Ref. 2/: Passiv ventilations test Fakse
- /Ref. 3/: Passiv ventilations test Askov
- /Ref. 4/: Passiv ventilations test Allerød
- /Ref. 5/: Fairbanks H.A. (1896). Notes on a breathing well. Science, 3, p. 693.
- /Ref. 6/: Buckinham, E. (1904). Contributions to our knowledge of the aeration of soils, U.S. Department of Agriculture Bureau of Soils Bulletin, 25, 7.
- /Ref. 7/: Robinson, A.L. and Sextro R.G. (1995). Direct measurement of soil-gas entry into an experimental basement driven by atmospheric pressure fluctuations, Geophysical Research Letters, 22(14).
- /Ref. 8/: Kjeldsen, P., Fischer, E.V. (1995). Landfill gas migration - field investigations at Skellingsted Landfill, Denmark. Waste Management & Research, 13, 467-585.
- /Ref. 9/: Nilson, R.H., Peterson E.W., Lie K.H., Burkhard N.R. and Hearst J.R. (1991). Atmospheric Pumping: a mechanism causing vertical transport of contaminated gases through fractured permeable media. Journal of Geophysical Research, 96(B13).
- /Ref. 10/ Smith, J.A., Tisdale, A.K., and Cho, H.J. (1996). Quantification of natural vapor fluxes of trichloroethene in the unsaturated zone at Picatinny Arsenal, New Jersey. Environmental Science and Technology, v. 30, no. 7, p. 2243-2250.
- /Ref. 11/ Pirkle, R.J., Wyatt, D.E., Price, V. and Looney, B.B. (1992). Barometric Pumping: The connection between the vadose zone and the atmosphere. Presented at the focus eastern regional ground water issue conference. Newton, MA.
- /Ref. 12/ Rojstaczer, S. and Riley F.S. (1990). Response of the water level in a well to earth tides and atmospheric loading under unconfined conditions. Water Resources Research. 26(8), 1803.
- /Ref. 13/ Rohay, V.J. (1996). Field Test of Passive Soil Vapor Extraction at the Hanford Site, Washington. U.S. Department of Energy. Office of Environmental Restoration and Waste Management.

- /Ref. 14/ Riha, B.D. and Rossabi, J. (1997). Miscellaneous Chemical Basin Treatability Study: An analysis of Passive Soil Vapor Extraction Wells (PSVE). Westinghouse Savannah River Company.
- /Ref 15/ Downs, W.C. (1993). Arid Passive Venting, IDI-4-10-01, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho.
- /Ref 16/ Rossabi, J. (1999). The influence of Atmospheric Pressure Variations on Subsurface Soilgas and the implications for Environmental Characterization and Remediation. Graduate School of Clemson University.
- /Ref 17/ J. Rossabi and R.W. Falta Analytical Solution for Subsurface Gas Flow to a Well Induced by Surface Pressure Fluctuations. Groundwater. Vol. 39 (5).
- /Ref. 18/ Lowry, B. (1999). Barometric Pumping With a Twist: VOC Containment and Remediation Without Boreholes. U.S.DOE Federal Energy Technology Center. Science and Engineering Associates. New Mexico.
- /Ref. 19/ Larson et al. (1999). Barometrically Driven Bioventing in Stratified Soils and Shallow Groundwater Conditions.
- /Ref. 20/ Southeastern Technology Center (1996). Final Report for the Barometric Pumping Demonstration Project. Prepared by U.S. Energy Corporation and Apex Environmental, Inc.
- /Ref. 21/ Modelling of PCE transport and remediation in the unsaturated zone. Anders G. Christensen, Anders Korsgaard and Charlotte E. Riis (NIRAS) and Peder Johansen (Copenhagen County, Denmark). Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Monterey, CA, May 2002).
- /Ref. 22/ Modelling af MTBE-transport og afværgetiltag i umættet zone. Anders Korsgaard og Anders G. Christensen, NIRAS. ATV møde – Vintermøde om Jord og Grundvandsforurening, marts 2001.
- /Ref. 23/ Diurnal and Semidiurnal Tides in Global Pressure Fields. Dai. A and Wang J. Journal of the Atmospheric Sciences. Volume 56, 1999.