

Variationer i poreluftens forureningsindhold

Spor 1. Opstilling af modelscenarier, udvælgelse af
modeller og modelberegninger

NIRAS A/S, COWI A/S og GeoSyntec

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	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
1.1 FORMÅL OG STRATEGI	11
1.2 FORUDSÆTNINGER OG BEGRÆNSNINGER	12
1.3 RAPPORTSTRUKTUR	12
2 TRANSPORT AF PORELUFT	13
2.1 KILDER TIL PORELUFTFORURENING	13
2.2 STYRENDE PROCESSER FOR TRANSPORT AF PORELUFT	13
2.3 STYRENDE PARAMETRE FOR TRANSPORT AF PORELUFT	14
3 SIMULERING AF PORELUFT	17
3.1 MODELLER TIL SIMULERING AF PORELUFT	17
3.1.1 <i>Analytiske løsninger</i>	17
3.1.2 <i>Numeriske løsninger</i>	18
3.2 ABREU OG JOHNSON'S MODEL	19
4 MODELSCENARIER OG MODEL-SETUP	21
4.1 AFGRÆNSNING OG VALG AF MODELPARAMETRE	21
4.1.1 <i>Forureningsmæssige forhold</i>	21
4.1.2 <i>Geologiske og hydrogeologiske forhold</i>	22
4.1.3 <i>Meteorologiske forhold</i>	22
4.1.4 <i>Bygningsmæssige forhold</i>	23
4.2 MODELSCENARIER	24
4.2.1 <i>Barometer variation</i>	26
4.2.2 <i>Indendørs tryk</i>	26
4.2.3 <i>Sprækkeplacering</i>	27
4.2.4 <i>Geologisk lagdeling</i>	28
4.2.5 <i>Kildeplacering</i>	29
4.2.6 <i>Kildestyrke</i>	30
4.2.7 <i>Aerob nedbrydning</i>	31
4.3 MODEL-SETUP	31
4.3.1 <i>Præsentation af modelresultater</i>	32
5 MODELRESULTATER	37
5.1 INTRODUKTION TIL PRÆSENTATION AF MODELRESULTATER	37
5.2 BAROMETERVARIATION	39
5.2.1 <i>Betydning af barometeramplitude og -periode</i>	39
5.2.2 <i>Betydning af dybde til grundvand og VOC-kilde</i>	40
5.2.3 <i>Betydning af sandtype</i>	41
5.2.4 <i>Betydning af bebyggelse</i>	42
5.3 INDENDØRS TRYK	44
5.4 SPRÆKKEPLACERING	46
5.5 GEOLOGISK LAGDELING	48

5.6	KILDEPLACERING	51
5.7	KILDESTYRKE	53
5.8	AEROB NEDBRYDNING	56
5.8.1	Betydning af kildestyrke	57
5.8.2	Betydning af dybde til grundvandsspejl og VOC-kilde	58
5.8.3	Betydning af bygningskonstruktion	59
6	DISKUSSION OG SAMMENFATNING	61
6.1	PORELUFTENS SPREDNINGSMØNSTER OMKRING BYGNINGER MED KÆLDER	61
6.2	BETYDNINGEN AF BAROMETERVARIATION	61
6.3	BETYDNINGEN AF KILDENS PLACERING OG TIDSLIG VARIATION I KILDESTYRKEN	63
6.4	BETYDNINGEN AF AEROB NEDBRYDNING	65
7	KONKLUSION	67
7.1	BEREGNINGSMODELLER	67
7.2	BAROMETERSKABTE VARIATIONER I PORELUFT- OG INDEKLIMAKONCENTRATIONER	67
7.3	RUMLIG VARIATION I PORELUFTKONCENTRATIONEN	68
8	REFERENCER	69
9	SYMBOLLISTE	71

BILAG

Bilag A	Barometervariation, scenarier 1.1-1.12
Bilag B	Indendørs tryk, scenarier 2.1-2.4
Bilag C	Sprækkeplacering, scenarier 3.1-3.4
Bilag D	Geologisk lagdeling, scenarier 4.1-4.14
Bilag E	Kildeplacering, scenarier 5.1-5.4
Bilag F	Kildestyrke, scenarier 6.1-6.8
Bilag G	Aerob nedbrydning, scenarier 7.1-7.4

Forord

Region Syddanmark har igangsat projektet "Variationer i poreluftens forureningsindhold" /Region Syddanmark, 2007/. Formålet med projektet er at udarbejde en metodik, hvorved der kan tages højde for rumlige og tidslige variationer i poreluftmålinger. Metodikken skal anvendes ved vurdering af poreluftmålinger i forbindelse med beslutning om kortlægning af lokaliteter på vidensniveau 2 samt vurdering af indeklimapåvirkning i konkrete og fremtidige bygninger.

Projektet er inddelt i to spor. Spor 1 "Vidensopbygning" er udarbejdet af NIRAS og COWI og spor 2 "Anvendelse og formidling af eksisterende viden" er udarbejdet af Orbicon /Andersen et al., 2009/. Nærværende rapport omhandler udelukkende spor 1 "Vidensopbygning".

Projektets spor 1 er gennemført af følgende projektgruppe:

- Annette Pia Mortensen, NIRAS
- Anders G. Christensen, NIRAS
- Lizzi Andersen, COWI
- Lilian Abreu, Geosyntec Consultants, USA
- Neal D. Durant, Geosyntec Consultants, USA

Projektets styregruppe har bestået af:

- Mette Christophersen (formand), Region Syddanmark
- Ole Ladefoged Mikkelsen, Region Syddanmark
- Preben Bruun, Miljøstyrelsen
- Christian Andersen, Videncenter for Jordforurening
- Mads Georg Møller, Rambøll
- Lotte Hjerrild, Rambøll

Endvidere har der været tilknyttet en følgegruppe, som har deltaget i to workshops afholdt i forbindelse med gennemførelse af projektet.

Følgegruppen har foruden styregruppen bestået af:

- Mariam Wahid, Region Hovedstaden
- Arne Rokkjær, Region Hovedstaden
- Børge Hvidbjerg, Region Midt
- Steffen Gram Lauridsen, Region Midt
- Susanne Pedersen, Region Sjælland
- Martin Stærmose, Region Sjælland
- Morten R. Nielsen, Region Syddanmark
- Henrik Nordtorp, Region Nord
- Jesper Simesen, Region Nord
- Tjalfe Poulsen, AAU
- Tage V. Bote, COWI
- Per Loll, DMR

- Jes Holm, GEO
- Jacqueline Anne Falkenberg, NIRAS
- Mette Broholm, Orbicon/DTU
- Anette Andersen, Orbicon
- Signe Nielsen, Orbicon

Sammenfatning og konklusioner

Hovedformålet med nærværende poreluftprojekt er at udarbejde en metodik til vurdering af variationen i poreluftmålinger, idet tidligere projekter har påvist både store tidslige og rumlige variationer ved måling af koncentrationen i poreluften. Projektet er inddelt i to spor, idet nærværende del af projektet har til formål at forbedre den eksisterende viden om, hvilke faktorer, der har væsentligst indvirkning på variationen i poreluftkoncentrationen.

Resultater og konklusioner i denne rapport er udelukkende baseret på modelsimuleringer. Simuleringerne er udført med en 3D numerisk model, udviklet af Abreu og Johnson, der medtager de væsentligste processer for porelufttransport. Abreau og Johnson modellen er udvalgt som et led i et litteraturstudie, der er gennemført for at finde modeller, der er i stand til at simulere porelufttransport. Men som for alle numeriske modeller, beskriver modellen ikke virkelighedens fulde kompleksitet, og resultaterne kan derfor ikke direkte overføres til en konkret forureningssag. Resultaterne kan i stedet anvendes til vurdering af, hvilke faktorer, der har størst betydning for poreluftvariationen og kan dermed anvendes som et hjælpeværktøj ved planlægning og udførelse af konkrete poreluftundersøgelser.

Ved opstilling af modelscenarierne har det været nødvendigt at begrænse dels antallet af parametre og dels variationen af parameterstørrelser. Inden for hver af de 4 parametergrupper: (1) forureningsmæssige forhold, (2) geologiske og hydrogeologiske forhold, (3) meteorologiske forhold og (4) bygningsmæssige forhold, er der således foretaget afgrænsninger både mht. hvilke udvalgte parametre, der varieres, og hvilke parameterstørrelser, der anvendes.

Det konkluderes på baggrund af modelscenarierne, at de største tidslige variationer i poreluftkoncentrationen optræder i nærheden af sprækker, hvor den advektive luftstrømning er dominerende, mens der generelt ses mindre variationer i den umættede zone, hvor diffusion er den dominerende transportproces. Endvidere konkluderes det, at den tidslige variationen af poreluftkoncentrationen i den umættede zone generelt er under +/- 82,5% omkring middelværdien – hvilket svarer til en faktor på mindre end 10 mellem den højeste og laveste koncentration.

Det konkluderes også, at den tidslige variation i koncentrationen i bygningen generelt er større end for poreluftkoncentrationen i jorden, og at denne variation bl.a. er kontrolleret af trykket i huset, luftskiftet i huset, sprækkens størrelse og jordens permeabilitet.

Det kan videre konkluderes, at en bygning med kælder vil have en vis indflydelse på både den horisontale og vertikale koncentrationsfordeling lige omkring og under huset. Det konkluderes endelig, at specielt kildeplaceringen i den umættede zone og lagdelinger (geologisk heterogenitet) samt aerob nedbrydning kan have en stor indflydelse på både den horisontale og vertikale koncentrationsfordeling lige omkring og under huset. Både den horisontale og vertikale variation kan således i nogle tilfælde variere en størrelsesorden over en afstand på 10 cm, mens denne variation ses over en afstand på 10 m i andre situationer.

Summary and conclusions

The main objective of this soil gas project is to develop a method for evaluating the variation in soil gas measurements, as earlier projects have shown large variations in soil gas concentrations with regard to both time and space. The project is divided into two phases, and the objective of this first phase is to improve existing knowledge about which factors have the most significant impact on the variation in soil gas concentrations.

The results and conclusions in this report are solely based on model simulations. The simulations are produced by a 3-dimensional numerical model developed by Abreu and Johnson that includes the most significant processes for soil gas transport. The Abreu and Johnson model was chosen on the basis of a literature study carried out to find models for the simulation of soil gas transport. However, as with all numerical models, this model does not describe the full complexity of real life conditions, and therefore it is not possible to transfer the results directly to an actual pollution project. Instead, the results can be used to evaluate which factors are most significant for soil gas variation and can, in that way, be used as a tool in the planning and execution of actual soil gas investigations.

In order to establish the model scenarios, it was necessary to limit the number of parameters, as well as the range of values modelled. Within each of the 4 groups of parameters – (1) contaminant conditions, (2) geological and hydrogeological conditions, (3) meteorological conditions, and (4) construction conditions – limitations have been made both with respect to which of the selected parameters are varied and which parameter values are applied.

On the basis of the model scenarios, it is concluded that the largest variations in the soil gas concentrations with regard to time are seen near fractures, where advective airflow is most dominant. Generally, there are smaller variations in the unsaturated zone, where diffusion is the dominant transport process. Furthermore, it is concluded that the variation in the soil gas concentration in the unsaturated zone is less than 82.5% above or below the average value – which corresponds to a factor of less than 10 between the highest and the lowest concentrations.

It is also concluded that the variation in the indoor air concentration in the building with regard to time is generally larger than for the soil gas concentrations in the soil, and that this variation is controlled by factors including the pressure within the building, the air change in the building, the size of the fracture and the permeability of the soil.

Furthermore, it can also be concluded that a building with a basement will have a certain influence on both the horizontal and the vertical concentration distribution in the immediate vicinity and beneath the building. Finally, it is concluded that, in particular, the location of the source in the unsaturated zone and the stratification (geological heterogeneity), and aerobic degradation may have a major impact on both the horizontal and the vertical concentration

distribution in the immediate vicinity and beneath the building. In some cases, both the horizontal and the vertical variation may thus vary by one order of magnitude over a distance of 10 cm, while in other situations this variation may be seen over a distance of 10 m.

1 Indledning

Spild af organiske stoffer, som olie- og benzinkomponenter og klorerede opløsningsmidler, medfører ofte forurening af poreluften i den umættede zone. Poreluftforureningen kan transporteres over større afstande og udgør først og fremmest en risiko ved indtrængning i nærliggende bebyggelse.

Måling af poreluftforurening udføres traditionelt ved at udtage en poreluftprøve igennem en sondering og analysere for indholdet af forureningskomponenter. Målingerne anvendes i forureningssager dels ved kortlægning af lokaliteter på Vidensniveau 2, hvor poreluftmålinger udføres til afgrænsning af forureningsområde og vurdering af forurenings sammensætning og -niveau, og dels ved vurdering af indeklimapåvirkning i såvel konkret som fremtidig bebyggelse.

Resultater fra poreluftmålinger har imidlertid vist såvel rumlig (geografisk og over dybden) som tidslig variation. I Poreluftprojektet /Miljøstyrelsen, 2006/ blev således påvist rumlig variation på op til 6 størrelsesordener inden for et begrænset areal og tidslig variation i et givent målepunkt på op til 2-4 størrelsesordener.

Denne variation medfører betydelig usikkerhed på anvendelsen af poreluftmålinger, og det er således ikke muligt at vurdere, om en given poreluftmåling er henholdsvis under, på eller over det forventede gennemsnitsniveau. For organiske stoffer er det oftest den gennemsnitlige påvirkning, som er relevant i forbindelse med risikovurdering. Baseres risikovurderingen på en usikker poreluftmåling, er der således mulighed for både at overvurdere og undervurdere indeklimarisikoen.

1.1 Formål og strategi

Hovedformålet med nærværende poreluftprojekt er at udarbejde en metodik til vurdering af variationen i poreluftmålinger. Projektet er inddelt i to spor, idet nærværende del af projektet har til formål at forbedre den eksisterende viden om, hvilke faktorer, der har væsentligst indvirkning på variationen i poreluftkoncentrationen.

Vidensopbygningen sker gennem modelsimuleringer, hvor betydningen af forskellige faktorer for variationen i poreluftkoncentration vurderes. Strategien for projektet har været at opstille og simulere modelscenarier, hvor forskellige faktorer med betydning for variationen i poreluftkoncentrationen varieres.

Modelscenarierne er opstillet dels på baggrund af teoretiske overvejelser omkring, hvilke faktorer, der har størst betydning for poreluftmålinger, og dels på baggrund af erfaringer fra tidligere modelsimuleringer.

Til simulering af de opstillede modelscenarier er udvalgt en 3D numerisk model, udviklet af Abreu og Johnson. Modellen er udvalgt på basis af et litteraturstudie, hvor relevante tilgængelige modeller er sammenlignet.

Resultaterne af modelscenarierne er anvendt til at vurdere, hvilke faktorer, der har størst betydning for variationen i poreluftmålinger, og hvilke faktorer, der har mindre eller ingen betydning.

1.2 Forudsætninger og begrænsninger

Resultater og konklusioner i denne rapport er udelukkende baseret på modelsimuleringer. Simuleringerne er udført med en 3D numerisk model, udviklet af Abreu og Johnson, der medtager de væsentligste processer for porelufttransport. Men som for alle numeriske modeller, beskriver modellen ikke virkelighedens fulde kompleksitet, og resultaterne kan derfor ikke direkte overføres til en konkret forurenings sag. Resultaterne kan i stedet anvendes til vurdering af, hvilke faktorer, der har størst betydning for poreluftvariationen og dermed kan anvendes som vejledning ved planlægning og udførelse af konkrete poreluftundersøgelser.

Simuleringerne tager udgangspunkt i et standardiseret model-setup baseret på homogen sandet geologi, en uendelig VOC-kilde, placeret på grundvands-spejlet, samt en bygning, hvor der inkluderes gastransport igennem en sprække i fundamentet. Med dette model-setup er opstillet forskellige scenarier, hvor effekten af udvalgte faktorer er simuleret. Ved simulering af transiente (fluktuerende) barometerforhold er en del af simuleringerne udført uden bebyggelse, eftersom simuleringstiden blev urealistisk lang i forhold til projektets deadline. Endvidere er der i scenarier med bebyggelse udelukkende simuleret begrænset variation i barometertrykket.

Den valgte model er ikke offentlig tilgængelig på nuværende tidspunkt. Simuleringerne er i stedet udført af Lillian Abreu, Geosyntec, der har udviklet modellen.

1.3 Rapportstruktur

Rapporten præsenterer resultater af modelscenarier, hvor forskellige parametre er varieret. Opstilling af modelscenarier og valg af model er baseret på et litteraturstudie, der dels har kortlagt, hvilke parametre, der har betydning for porelufttransport, og dels hvilke modeller, der kan anvendes til simulering af porelufttransport.

Rapporten er inddelt i følgende afsnit:

- Afsnit 2: Transport af poreluft
- Afsnit 3: Simulering af poreluft
- Afsnit 4: Modelscenarier og model-setup
- Afsnit 5: Modelresultater
- Afsnit 6: Diskussion og sammenfatning
- Afsnit 7: Konklusion

2 Transport af poreluft

2.1 Kilder til poreluftforurening

Poreluftforurening kan forekomme ved spild af en forureningskilde, der ved normale temperaturer og trykforhold afdamper helt eller delvis til gasfasen, dvs. en såkaldt VOC (Volatile Organic Compound). Forureningskilden kan findes enten på gasform, opløst i vandfasen eller som residual eller fri fase NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid). Forureningskilden kan således være placeret både i den umættede zone, opløst i grundvandet eller ovenpå grundvandsspejlet som fri fase NAPL.

VOC-kilder kan generelt inddeles i to grupper, afhængig af deres nedbrydelighed. Aerobe nedbrydelige VOC'er, som fx benzin- og oliekomponenter, nedbrydes under tilstedeværelsen af ilt pga. mikrobiel aktivitet, og nedbrydes således generelt let i den umættede zone. VOC'er, som chlorerede opløsningsmidler (fx tetrachlorethylen (PCE) og trichlorethylen (TCE)), har en meget lav nedbrydelighed under iltrige forhold og anses generelt som ikke-nedbrydelige i den umættede zone.

2.2 Styrende processer for transport af poreluft

Transport af poreluft i den umættede zone er styret af fire processer (Miljøstyrelsen, 2006; COWI, 2005/:

- Fasefordeling
- Nedbrydning
- Diffusion
- Advektion

Fasefordelingen af en VOC, dvs. fordelingen mellem fri fase NAPL, VOC sorberet til jorden, VOC opløst i vandfasen og VOC fordampet til gasfasen, styrer, hvor stor en del af VOC'en, der kan transporteres i poreluften. Fasefordelingen afhænger dels af VOC'ens fysisk-kemiske egenskaber og dels af jordens egenskaber. Således er stoffets opløselighed, flygtighed og sorptions-egenskaber sammen med jordens vandindhold og indhold af organisk stof væsentlige parametre. Kan VOC'en undergå aerob nedbrydning, vil nedbrydeligheden endvidere være en væsentlig proces for transporten af poreluft.

Selve porelufttransporten er styret af henholdsvis diffusion og advektion og kan finde sted i alle 3 dimensioner. Diffusiv transport af poreluft i den umættede zone er styret af koncentrationsforskelle. Diffusionen finder sted i såvel luft- som vandfasen, men eftersom diffusionskoefficienten for VOC i luft er ~10.000 gange større end i vand, vil diffusion i luftfasen være dominerende. Advektiv transport af poreluft skyldes trykforskelle i den umættede zone. Trykforskelle kan fx forekomme imellem jordmatricen og atmosfæren pga. barometervariationer. Endvidere kan der forekomme trykforskelle mellem jordmatricen og eventuel bebyggelse, som først og

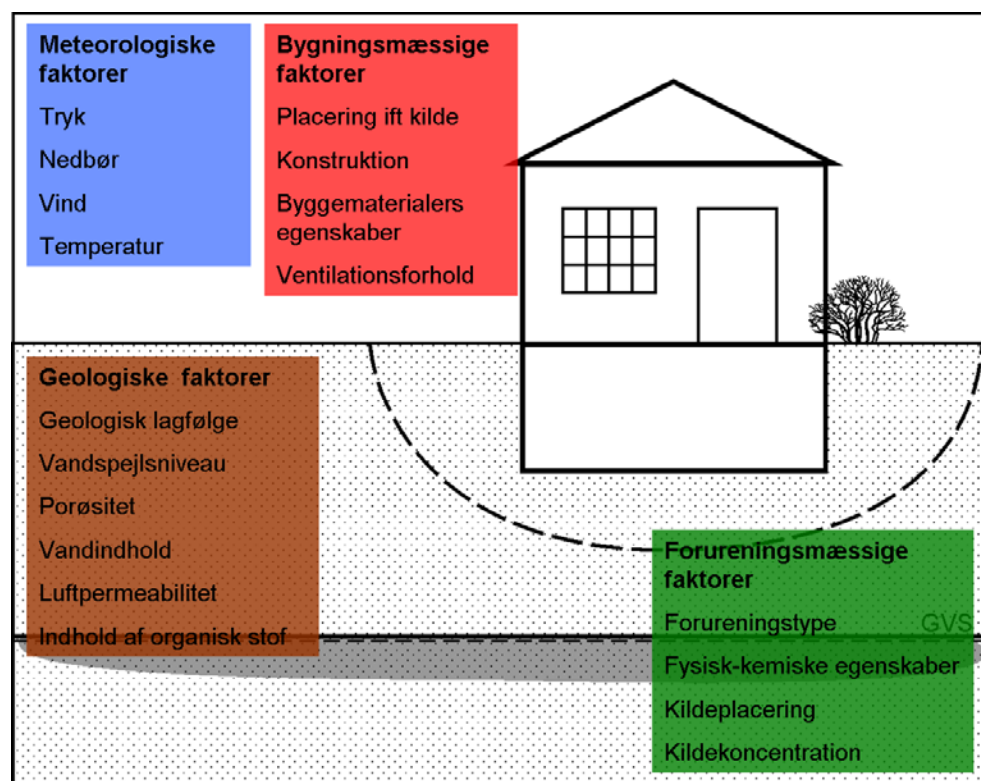
fremmest er styret af temperaturforskelle, vindpåvirkning, variation i barometertryk og anvendelse af mekanisk udluftning, som fx emhætte og aircondition. På grund af sprækker eller andre åbninger i fundament eller kældervægge vil selv små over- eller undertryk imellem bebyggelsen og jordmatricen medføre advektiv transport ind og ud af bygningen.

2.3 Styrende parametre for transport af poreluft

De fire styrende processer for porelufttransport er som nævnt i ovenstående afsnit afhængige af adskillige parametre, der generelt kan inddeles i følgende hovedgrupper:

- Forureningsmæssige forhold
- Geologiske og hydrogeologiske forhold
- Meteorologiske forhold
- Bygningsmæssige forhold

De væsentligste parametre i hver af de fire grupper er skitseret på figur 2.1 og listet i tabel 2.1.



Figur 2.1 Parametre med betydning for porelufttransport.

Transporten af poreluft afhænger som nævnt af VOC'ens karakteristika, herunder forureningstype, placering, koncentration og fysisk-kemiske egenskaber, hvoraf de væsentligste er listet i tabel 2.1.

De geologiske og hydrogeologiske forhold har dels betydning for fasefordelingen af VOC'en og dels for den diffusive og advektive transport. Flere meteorologiske forhold har betydning for porelufttransporten. For eksempel kan variationer i barometertryk og vind påvirke den advektive transport, og en kraftig nedbørshændelse reducerer den diffusive transport.

Bygningsmæssige forhold, som fx konstruktion og antallet af fundamentsprækker, har betydning for den advective transport imellem jordmatricen og bebyggelsen.

Inddelingen af de styrende parametre listet i 2.1 anvendes ligeledes ved opstilling af modelscenarier i afsnit 4.

Tabel 2.1 Parametre med betydning for porelufttransport.

Gruppe	Parameter	Bemærkninger/symbol
Forureningsmæssige forhold	Forureningstype	Olie; benzin; klorerede opløsningsmidler
	Kilde placering	Fri fase; opløst; sorberet
	Kilde koncentration	C
	Diffusionskoefficient i luft	D_a
	Diffusionskoefficient i vand	D_w
	Henrys konstant	H
	Sorptionskoefficient	K_{oc}
Nedbrydningskoefficient	λ	
Geologiske og hydrogeologiske forhold	Geologisk lagfølge	Lagdeling; dæklag
	Vandspejlsniveau	Dybde af umættet zone, d
	Total porøsitet	ϕ_T
	Vandfyldt porøsitet	ϕ_w
	Luftpermeabilitet	K_g
	Volumenvægt	ρ_b
Meteorologiske forhold	Indhold af organisk stof	f_{oc}
	Barometertryk	p_{atm} ; amplitude, A; periode, T
	Nedbør	Ændring i vandindhold; vandstrømning
	Vind	Vindhastighed, v
Bygningsmæssige forhold	Vind	Vindhastighed, v
	Temperatur	t
	Placering i landskab	Placering af bygning ift. forureningskilde
	Bygningskonstruktion	Kælder; krybekælder; kapillarbrydende lag
Bygningsmæssige forhold	Byggematerialers egenskaber	Fundamenttykkelse d_f ; sprækkelængde; sprækkevidde
	Ventilationsforhold	Indendørs tryk p_{ind} ; luftudveksling A_{ex}

3 Simulering af poreluft

3.1 Modeller til simulering af poreluft

Numeriske modeller med varierende kompleksitet anvendes ofte ved beskrivelse af strømning og transport i den umættede zone. Oftest inkluderer modellerne udelukkende strømning af én aktiv fase, dvs. enten strømning i vandfasen eller strømning i gasfasen, og kun få modeller kan simulere samtidig strømning og transport af både vand- og gasfasen samt en eventuel fri fase NAPL.

Med det formål at udvælge en model til simulering af poreluftscenarier er der udført et litteraturstudie af tilgængelige modeller. Ved gennemgangen er der skelnet mellem analytiske og numeriske løsninger. De analytiske modeller anvendes typisk, hvor transportligningen er lineær og et entydigt løsningsudtryk direkte kan udledes. De numeriske modeller anvendes i modsætning hertil, når transportligningen ikke er lineær, eller det af andre årsager ikke er muligt at udlede en eksakt løsning. Med de numeriske modeller beregnes således en approksimativ løsning til transportligningen, og afhængig af den valgte rumlige diskretisering og størrelsen af de beregningsmæssige tidskridt, kan løsningen blive så nøjagtig som der er behov for.

Der er udelukkende inkluderet kontinuumsmodeller, dvs. modeller, der beskriver strømning og transport i homogene medier. Modeller, som beskriver flere kontinuua, som fx dobbelt-kontinuum modeller til beskrivelse af sprække-transport i et mobil-immobilt system, er således ikke inkluderet. Dels indeholder denne type modeller ofte en kompleksitet, som ikke er nødvendig i nærværende projekt, og dels inkluderer disse modeller generelt ikke strømning og transport i gasfasen.

Resultaterne af litteraturgennemgangen er kort gengivet i to tabeller for henholdsvis analytiske og numeriske løsninger. De to tabeller udgør ikke en samlet liste over tilgængelige modeller, men kun en liste over de hyppigst anvendte.

3.1.1 Analytiske løsninger

Hyppigt anvendte analytiske løsninger til simulering af gastransport i den umættede zone er samlet i tabel 3.1.

Der er udviklet adskillige analytiske løsninger, fx Johnson og Ettinger, RISC og GSI RBCA Tool Kit, der anvendes som screeningsmodeller ved beregning af indeklimapåvirkningen fra en poreluftforurening. Hovedparten af disse modeller er bygget op omkring Johnson og Ettingers model /Johnson og Ettinger, 1991/, som er den hyppigst anvendte screeningsmodel til vurdering af indeklimapåvirkning fra organiske forureninger i USA. Modellen inkluderer advektiv og diffusiv transport i gasfasen i den umættede zone samt advektiv transport igennem en 1D sprække ind i bygningen.

Tabel 3.1 Analytiske løsninger til simulering af gastransport i umættet zone.

Model	Dimension	Stationær (S)/ Transient (T)	Processer i vand			Processer i gas			Processer i bygning	Nedbrydning og sorption	
			Advektion	Diffusion	Dispersion	Advektion	Diffusion	Dispersion	Advektion igennem fundament	Nedbrydning	Sorption (ligevægt)
Jury et al. (1983)	1D	T	X	X		X	X			X	X
Shan & Stephens (1995)	1D	T	X	X	X	X	X	X		X	X
Nielsen (2007)	3D	T	X	X	X	X	X	X			X
R-UNSAT Lahvis og Baehr (1997)	1D	S+T				X	X				X
JAGG Miljøstyrelsen (2006)	1D	S					X		X		
Johnson og Ettinger (1991)	1D	S					X		X		
RISC (2004)	1D	S					X		X		
GSI RBCA Tool Kit (2004)	1D	S					X		X	X	

3.1.2 Numeriske løsninger

Eksempel på numeriske modeller til simulering af gastransport i den umættede zone er samlet i tabel 3.2.

Der er udviklet flere modeller, fx HYDRUS, T2VOC og UTCHEM, som kan simulere samtidig strømning og transport af såvel vandfase, gasfase og fri fase NAPL. Endvidere er der modeller, fx MODFLOW-SURFACT, som kan simulere advektiv strømning og transport af én fase (fx vand-, gas- eller NAPL-fase) og diffusiv transport i de passive faser. Fælles for modellerne er, at de ikke direkte inkluderer transport ind i bygninger. Ønskes påvirkningen af bebyggelse simuleret, er det således nødvendigt at inkludere særlige randbetingelser omkring bygningens fundament og efterfølgende beregne koncentrationen inde i bygningen vha. en analytisk løsning.

Abreu og Johnson /Abreu og Johnson, 2005/ har udviklet en 3D model specielt til simulering af poreluft i den umættede zone. Modellen inkluderer advektiv og diffusiv transport af poreluft i den umættede zone samt advektiv transport igennem sprækker i fundament samt opblanding inde i bygningen.

Tabel 3.2 Numeriske løsninger til simulering af gastransport i umættet zone.

Model	Dimension	Stationær (S)/ Transient (T)	Processer i vand			Processer i gas			Processer i fri fase		Processer i bygning	Nedbrydning og sorption	
			Advektion	Diffusion	Dispersion	Advektion	Diffusion	Dispersion	Advektion	Diffusion	Advektion igennem fundament	Nedbrydning	Sorption/ligevægt
Abreu og Johnson (2005)	3D	S/T		X		X	X				X	X	X
HYDRUS-1D (2008)	1D	T	X	X		X	X					X	X
HYDRUS 2D/3D (2008)	2D- 3D	T	X	X	X		X					X	X
MODFLOW SURFACT* (1996)	3D	T	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
T2VOC/TMVOG (2002)	3D	T	X	X		X	X		X	X		X	X
UTCHEM (2000)	3D	S/T	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
STOMP (2003)	3D	S/T	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

*MODFLOW-SURFACT kan udelukkende håndtere advektiv strømning og transport af én aktiv fase (dvs. enten vand-, gas- eller NAPL-fase).

3.2 Abreu og Johnson's Model

Ved valg af model til simulering af poreluftscenarier er der lagt vægt på at finde én model, som kan simulere alle scenarier. Dette giver den fordel, at modelresultaterne kan sammenlignes direkte og at betydningen af forskellige parametre på poreluftkoncentrationen ligeledes kan vurderes direkte.

For at kunne simulere de opstillede poreluftscenarier og opnå den kompleksitet, der er nødvendig for at kunne simulere alle væsentlige processer, er valgt den numeriske model, udviklet af Dr. Lilian D.V. Abreu og Dr. Paul C. Johnson fra Arizona State University /Abreu og Johnson, 2005, 2006/. Abreu og Johnson modellen har den fordel i forhold til de andre numeriske modeller til umættet zone, at den inkluderer processerne omkring gasindtrængning i bygninger. Dermed kan modellen dels simulere bygningers betydning for poreluftkoncentrationen og dels den resulterende koncentration inde i bygningen.

Modellen er en 3D numerisk model, som simulerer trykfordeling i gasfasen, advektiv og diffusiv transport i gasfasen, advektiv transport igennem sprækker i fundament samt indendørs fortynding. Endvidere inkluderer modellen

sorption samt 1. ordens nedbrydning. Modellen kan simulere tidslig variation i trykrandbetingelser på såvel terræn som inde i bygningen.

Modellen har været anvendt i adskillige modelstudier i USA og er senest blevet anvendt i et projekt udført af API /API, 2009/, hvor betydningen af aerob nedbrydning for transport af flygtige oliekomponenter til indeklimaet blev undersøgt. For nærmere beskrivelse af modellen henvises til /Abreu og Johnson, 2005, 2006/.

4 Modelscenarier og model-setup

4.1 Afgrænsning og valg af modelparametre

Poreluftkoncentrationen målt i et givent punkt på et givent tidspunkt afhænger, som beskrevet i afsnit 2, af adskillige parametre. Med det formål at undersøge, hvilke faktorer, der har størst betydning for variationen i poreluftmålinger, er opstillet modelscenarier, som simuleres med den udvalgte model.

Ved opstilling af modelscenarierne har det været nødvendigt at begrænse dels antallet af parametre og dels variationen af parameterstørrelser. Inden for hver af de 4 parametergrupper: (1) forureningsmæssige forhold, (2) geologiske og hydrogeologiske forhold, (3) meteorologiske forhold og (4) bygningsmæssige forhold (jf. tabel 2.1), er der således foretaget afgrænsninger både mht. hvilke udvalgte parametre, der varieres, og hvilke parameterstørrelser, der anvendes.

Afgrænsninger og variationer for de udvalgte parametre er beskrevet i nedenstående afsnit for hver af de 4 parametergrupper. For hver parameter er angivet, hvilken værdi, der anvendes som standard i de opstillede scenarier, hvor der er taget udgangspunkt i standardværdier anvendt i JAGG-modellen /Miljøstyrelsen, 1998/. Specifikke parametre anvendt i hvert enkelt scenarie er beskrevet i afsnit 4.2.

4.1.1 Forureningsmæssige forhold

Med de opstillede modelscenarier simuleres udelukkende transport af opløste enkeltstoffer. Der tages således ikke hensyn til den kompleksitet, som er nødvendig ved simulering af blandingsforureninger og fri fase NAPL.

Simuleringerne er udført med tre forskellige VOC'er med fysisk-kemiske egenskaber, svarende til typiske forureningskomponenter fundet i poreluft. VOC1 og VOC2 har egenskaber, der svarer til hhv. trichlorethylen (TCE) og vinylchlorid (VC), mens VOC3 har egenskaber svarende til benzen. Ved simuleringerne er således anvendt to chlorerede VOC'er, der ikke antages at være nedbrydelige, men som har væsentligt forskellige sorptionskoefficienter. Endvidere er der anvendt én typisk aromatisk kulbrinte fra olie-/benzinprodukter, som antages at være biologisk nedbrydelig. De fysisk-kemiske egenskaber for de tre VOC'er er listet i tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parametre anvendt for forureningsmæssige forhold.

Parameter	Symbol	VOC1	VOC2	VOC3
Diffusionskoefficient i luft	D_a [m ² /s]	7,9E-6	1,1E-5	8,8E-6
Diffusionskoefficient i vand	D_w [m ² /s]	9,1E-10	1,2E-9	9,8E-10
Henrys konstant	H [-]	0,42	1,1	0,228
Sorptionskoefficient	K_{oc} [l/kg]	190	18,6	61,7
1. ordens nedbrydningskoefficient	λ [d ⁻¹]	0	0	0,18

Værdier med fed angiver standard-værdien anvendt i scenarierne.

Hovedparten af modelscenarierne er udført med konstant kildestyrke fra en uendelig grundvandsbåren forureningskilde. Simuleringerne er udført ved at simulere en konstant poreluftkoncentration umiddelbart over grundvandspejlet, svarende til mætningskoncentrationen fra en fri fase NAPL på eller omkring grundvandsspejlet. For scenarier uden nedbrydning er anvendt en enhedskildestyrke på 1 g/cm^3 , således at de simulerede poreluftkoncentrationer svarer direkte til den normaliserede gaskoncentration.

Der er udført enkelte simuleringer, hvor kildestyrken er varieret. Her er anvendt en kildekonzentration mellem $1\text{E-}6$ til $1\text{E-}8 \text{ g/cm}^3$. Endvidere er der udført enkelte simuleringer med nedbrydning (VOC3), hvor der er anvendt en vandig kildekonzentration på hhv. 20 mg/l og 200 mg/l , hvilket svarer til en gaskonzentration på $4,5\text{E-}6$ og $4,5\text{E-}7 \text{ g/cm}^3$ for VOC3.

I scenarier med en afgrænset kilde placeret i den umættede zone er anvendt en kildestørrelse på $30 \times 30 \text{ m}$.

4.1.2 Geologiske og hydrogeologiske forhold

Modelscenarierne inkluderer udelukkende homogene medier og strømning, og transport i sprækker eller andre præferentielle transportveje medtages ikke. Hovedparten af modelscenarierne er udført med homogent sand, idet der er udført scenarier med fint og mellemkornet sand. Enkelte scenarier inkluderer endvidere homogent sand med lagdeling af mindre permeabelt materiale. Anvendte værdier for porøsitet, vandindhold og luftpermeabilitet fremgår af tabel 4.2.

For det organiske indhold er anvendt en standard-værdi på $0,01$ (-), idet den i udvalgte scenarier er ændret til $0,001$ (-). Betydningen af grundvandsspejlets placering, dvs. størrelsen af den umættede zone, og dermed afstanden fra terræn til VOC kilde, er simuleret i flere af scenarierne, idet der henholdsvis er anvendt et højtliggende vandspejl på 3 m u.t. og et dybere liggende vandspejl på 8 m u.t.

Tabel 4.2 Parametre anvendt for geologiske og hydrogeologiske forhold.

Parameter	Symbol	Medium sand	Fint sand
Total porøsitet	ϕ_T [-]	0,35	0,35
Vandfyldt porøsitet	ϕ_w [-]	0,07	0,07; 0,21
Luft permeabilitet	K_a [m^2]	1E-11	1E-12; 1E-13
Volumenvægt	ρ_b [kg/m^3]	1700	1700
Indhold af organisk stof	f_{oc} [-]	0,01; 0,001	0,01
Vandspejlsniveau	d [m]	3; 8	3; 8

Værdier med fed angiver standard-værdien anvendt i scenarierne.

4.1.3 Meteorologiske forhold

Der er udført simulering med såvel steady-state og transient barometertryk. I scenarierne med steady-state er der anvendt et absolut barometertryk på $P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$ (= 1 atm). Ved simulering med transient barometertryk er variationen angivet ved en sinusfunktion med en given amplitude og periode. Alle scenarier med transient barometertryk er først udført som en steady-state simulering. Resultatet fra denne simulering anvendes som start for simuleringen med transient barometertryk. Det har ikke været muligt med modellen at simulere længere tidsserier med naturligt målte barometervariationer pga. numerisk instabilitet. Endvidere har størrelse af amplitude og periode været begrænset af modellens simuleringstid.

Der er ikke udført scenarier, hvor nedbørsintensitet, vindforhold og temperaturændringer simuleres. De anvendte meteorologiske parametre er angivet i tabel 4.3, idet standard-værdier er markeret med fed.

Tabel 4.3 Parametre anvendt for meteorologiske forhold.

Parameter	Symbol	Steady-state	Transient
Barometertryk	P [Pa]	101325	101325
Trykamplitude	A [mbar]	0	1; 3 ; 15; 30; 50
Trykperiode	T [dage]	0	0,083; 0,5 ; 5; 20
Nedbør	q_w [m/s]	0	0
Vind	v [m/s]	0	0
Temperatur	T [°C]	25	25

Værdier med fed angiver standard-værdien anvendt i scenarierne.

4.1.4 Bygningsmæssige forhold

Hovedparten af modelscenarierne er udført med bebyggelse henholdsvis med og uden kælder. Der er således ikke udført scenarier med mere avancerede fundamentskonstruktioner, som fx krybekælder, kapillarbrydende lag mv. Der er anvendt en bygningsstørrelse på 10x10 m med en dybde på 2 m u.t. i scenarier med kælder og en dybde på 0,2 m u.t. i scenarier uden kælder.

I alle scenarier med bebyggelse er antaget en sprække på 1 mm langs fundamentets periferi. Dette svarer til erfaringer fra AVJ, der dokumenterer, at revner i betondække opstår langs fundamentet og at den totale revnelængde kan skønnes at være af samme størrelsesorden som omkredsen af fundamentet /AVJ, 2002/. I enkelte scenarier er endvidere antaget en sprække langs såvel periferi som igennem midten af fundament.

Trykket inde i bygningen er angivet som et relativt tryk i forhold til atmosfæretrykket. Hovedparten af scenarierne er udført enten med neutralt tryk eller et undertryk på 5 Pa i forhold til atmosfæretrykket. Dette svarer til værdien anvendt i JAGG /Miljøstyrelsen, 1998/ samt den størrelsesorden på 1-3 Pa, der typisk måles i danske huse /Miljøstyrelsen, 2006/. I enkelte scenarier er endvidere anvendt et undertryk på 10 Pa og et overtryk på 5 Pa. Indendørstrykket følger variationen i atmosfæretrykket, dvs. for scenarier udført med transient barometertryk følger indendørstrykket samme amplitude og periode som atmosfæretrykket. For scenarier med neutralt tryk i bygningen er indendørstrykket således til enhver tid identisk med atmosfæretrykket.

De anvendte parametre til beskrivelse af bygningsforhold er angivet i tabel 4.4, idet standard-værdier er markeret med fed.

Tabel 4.4 Parametre anvendt for bygningsmæssige forhold.

Parameter	Symbol	Bygning med kælder	Bygning uden kælder
Bygnings længde	l [m]	10	10
Bygnings bredde	b [m]	10	10
Bygnings dybde	D [m]	2	0,2
Fundamenttykkelse	d_f [m]	0,15	0,15
Sprækkeplacering		Periferi ; center	Periferi
Sprækkelængde	l_s [m]	39 ; 49	39
Sprækkevidde	w_s [m]	0,001	0,001
Luftudveksling	A_{ex} [t^{-1}]	0,5	0,5
Relativt tryk i bygning	ΔP [Pa]	0 ; 5; 10; -5	5

Værdier med fed angiver standard-værdien anvendt i scenarierne.

4.2 Modelscenarier

Der er udført i alt 50 modelscenarier, hvor forskellige modelparametre er varieret. Scenarierne er inddelt i følgende syv grupper, idet der inden for hver gruppe er udført mellem 4-14 scenarier:

1. Barometervariation
2. Indendørs tryk
3. Sprækkeplacering
4. Geologisk lagdeling
5. Kildeplacering
6. Kildestyrke
7. Aerob nedbrydning

Scenarierne er detaljeret beskrevet i afsnittene 4.2.1 til 4.2.7. Endvidere er der i tabel 4.5 præsenteret en samlet oversigt over, hvilke parametre, der er varieret inden for de enkelte grupper.

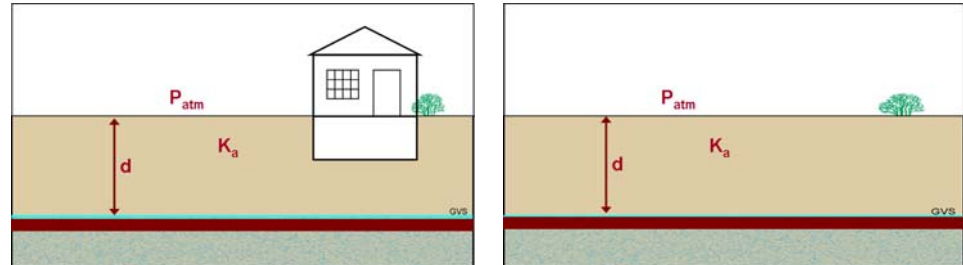
Tabel 4.5 Oversigt over parametre varieret indenfor modelgrupper.

Forhold	Parameter / Scenarie nr.	1.1-1.4	1.5-1.12	2.1-2.2	2.3-2.4	3.1-3.4	4.1-4.4	4.5-4.14	5.1-5.2	5.3-5.4	6.1-6.2 6.5-6.6	6.3-6.4 6.7-6.8	7.1	7.2	7.3-7.4
Foreningsmæssige forhold	VOC kilde ved grundvandsspejl	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
	VOC kilde i umættet zone								X	X					
	Konstant VOC kilde	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	
	Variere VOC kilde											X			X
	VOC uden nedbrydning	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
	VOC med nedbrydning												X	X	X
	Homogent sand med konstant K_a					X	X			X	X	X	X	X	X
Geologiske og hydrogeologiske forhold	Homogent sand med varierende K_a	X	X	X											
	Lagdeling med lavpermeable lag						X	X							
	Konstant f_{oc}	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
	Variere f_{oc}										X	X			
	Konstant afstand til grundvandsspejl			X	X	X	X	X	X	X			X	X	
	Variere afstand til grundvandsspejl	X	X									X	X		X
	Steady-state barometertryk					X			X	X	X	X	X	X	X
Meteorologiske forhold	Transient barometertryk	X	X	X		X	X								
	Ingen bebyggelse		X												
	Bygning med kælder	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	Bygning uden kælder													X	
	Neutral tryk i bygning	X					X	X				X			
	Over/undertryk i bygning			X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
	Sprække langs periferi	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Sprække langs periferi samt midt						X									

4.2.1 Barometer variation

Der er udført i alt 12 scenarier med det formål at vurdere betydningen af barometervariation på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.1.



Figur 4.1 Model-setup anvendt ved simulering af barometervariation dels med bebyggelse (til venstre) og dels uden bebyggelse (til højre).

Barometertrykket er varieret ved at simulere forskellige kombinationer af barometeramplitude og -periode, som angivet i tabel 4.6. De første 4 scenarier er udført med bebyggelse, men pga. modeltekniske begrænsninger er de resterende scenarier, hvor barometervariationen er større, udført uden bebyggelse. Foruden barometertrykket er geologi og dybde til grundvandsspejl varieret. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.6.

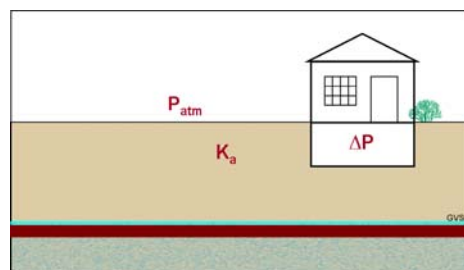
Tabel 4.6 Scenarier udført med transient barometertryk.

Nr.	Sand	Luft-permeabilitet [m ²]	Dybde til GVS [m]	Barometer amplitude [mbar]	Barometer periode [dage]	Bebyggelse
1.1	Fin	1E-12	8	3	0,5	Med kælder
1.2	Medium	1E-11	8	3	0,5	Med kælder
1.3	Medium	1E-11	3	3	0,5	Med kælder
1.4	Medium	1E-11	8	1	0,083	Med kælder
1.5	Medium	1E-11	8	30	20	Uden bygning
1.6	Medium	1E-11	8	15	20	Uden bygning
1.7	Medium	1E-11	8	15	5	Uden bygning
1.8	Fin	1E-12	8	50	20	Uden bygning
1.9	Fin	1E-12	8	30	20	Uden bygning
1.10	Medium	1E-11	3	50	20	Uden bygning
1.11	Medium	1E-11	3	30	20	Uden bygning
1.12	Medium	1E-11	3	30	5	Uden bygning

4.2.2 Indendørs tryk

Der er udført i alt 4 scenarier med det formål at vurdere betydningen af indendørstrykket på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.5.



Figur 4.5 Model-setup anvendt ved simulering af indendørs tryk.

Det indendørs tryk er varieret, idet der er udført scenarier med henholdsvis et undertryk i forhold til atmosfæretryk på 5 og 10 Pa og et overtryk i forhold til atmosfæretryk på 5 Pa. De første scenarier er udført med transient barometertryk og henholdsvis medium fint og fint sand. Derudover er der udført to scenarier med steady-state barometertryk. Indendørstrykket følger som nævnt variationen i barometertrykket, dvs. i scenarierne med transient barometertryk følger indendørstrykket samme amplitude og periode. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.7.

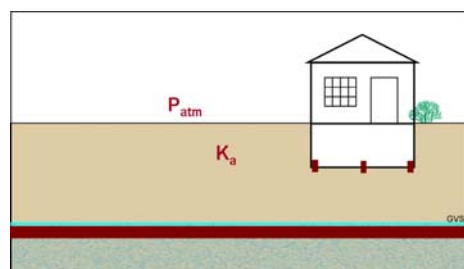
Tabel 4.7 Scenarier udført med varierende indendørs tryk.

Nr.	Sand	Luft-Permeabilitet [m ²]	Dybde til GVS [m]	Barometer amplitude [mbar]	Barometer periode [dage]	Bebyggelse	Indendørs tryk [Pa]
2.1	Medium	1E-11	8	3	0,5	Med kælder	5
2.2	Fint	1E-12	8	3	0,5	Med kælder	5
2.3	Medium	1E-11	8	0	0	Med kælder	10
2.4	Medium	1E-11	8	0	0	Med kælder	-5

4.2.3 Sprækkeplacering

Der er udført i alt 4 scenarier med det formål at vurdere betydningen af sprækkeplacering på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.6.



Figur 4.6 Model-setup anvendt ved simulering af sprækkeplacering.

Alle scenarier er udført med en sprække både langs fundamentets periferi og langs fundamentets midte. Dermed er såvel sprækkeplaceringen samt den samlede sprækkelængde forskellig fra de resterende scenarier, hvor der udelukkende er simuleret en sprække langs fundamentets periferi. Sprækkelængden er således nu øget fra 39 m til 49 m.

De første scenarier er udført med transient barometertryk og henholdsvis medium fint og fint sand. Derudover er der udført to scenarier med steady-

state barometertryk og henholdsvis over- og undertryk i bygningen. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.8.

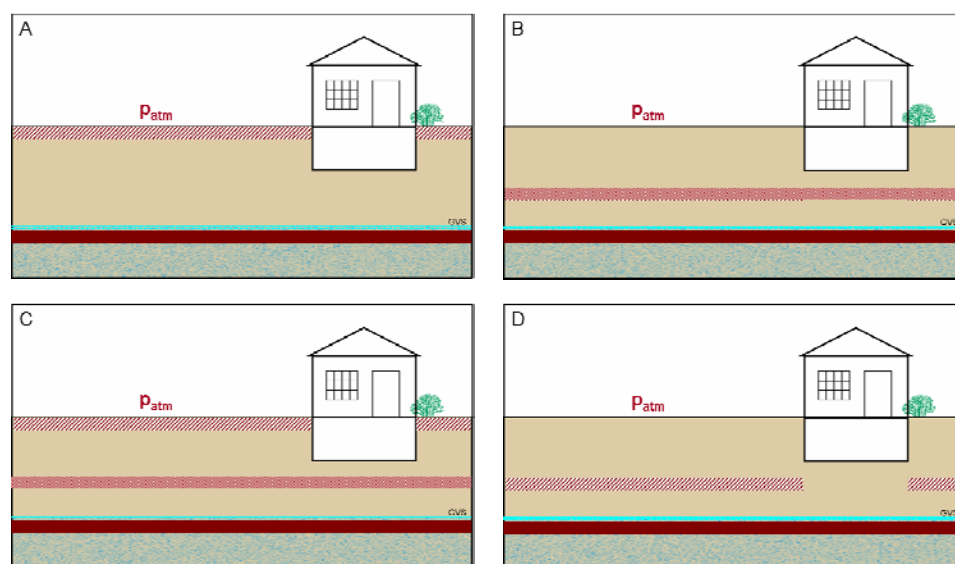
Tabel 4.8 Scenarier udført med varierende sprækkeplacering.

Nr.	Sand	Luft-permeabilitet [m ²]	Dybde til GVS [m]	Barometer amplitude [mbar]	Barometer periode [dage]	Bebyg-gelse	Inden-dørs tryk [Pa]
3.1	Medium	1E-11	8	3	0,5	Med kælder	0
3.2	Fint	1E-12	8	3	0,5	Med kælder	0
3.3	Medium	1E-11	8	0	0	Med kælder	5
3.4	Medium	1E-11	8	0	0	Med kælder	-5

4.2.4 Geologisk lagdeling

Der er udført i alt 14 scenarier med det formål at vurdere betydningen af geologisk lagdeling på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med 4 forskellige model-setup som vist på figur 4.7.



Figur 4.7 Model-setup anvendt ved simulering af geologisk lagdeling.

Der er udført scenarier med 4 forskellige geologiske lagdelinger, hvor der i medium fint sand med en gaspermeabilitet på $1E-11 \text{ m}^2$ og et vandindhold på 0,07 er indsat/indlagt lag med en gaspermeabilitet på $1E-13 \text{ m}^2$ og et vandindhold på 0,21. De mindre permeable lag har hver en udbredelse på 1 m og er placeret som vist på figur 4.7. Således er der ved lagdeling A et lavpermeabelt lag mellem 0-1 m u.t., ved lagdeling B et lavpermeabelt lag mellem 3-4 m u.t., ved lagdeling C et lavpermeabelt lag mellem 0-1 m u.t. og 3-4 m u.t. og ved lagdeling D et lavpermeabelt lag fra 3-4 m u.t. med en åbning under bygningen.

For hver af de geologiske lagdelinger er der udført et scenarie med transient barometertryk og neutralt tryk inde i bygningen samt to scenarier med steady-state barometertryk og henholdsvis over- og undertryk i bygningen. Endelig er der til sammenligning udført to scenarier uden lagdeling med henholdsvis over- og undertryk i bygningen. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.9.

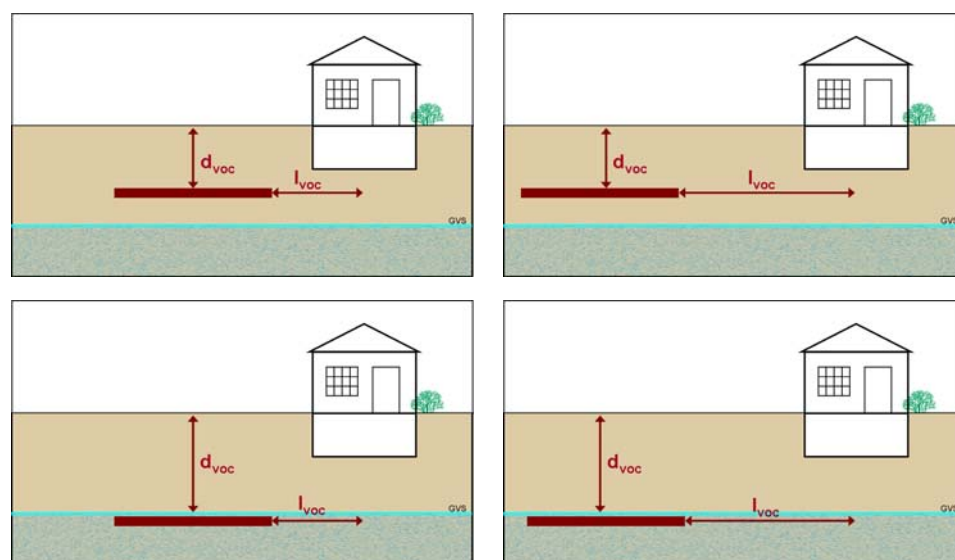
Tabel 4.9 Scenarier udført med geologisk lagdeling.

Nr.	Sand	Dybde til GVS [m]	Barometer amplitude [mbar]	Barometer periode [dage]	Bebyggelse	Indendørs tryk [Pa]
4.1	Lagdeling A	8	3	0,5	Med kælder	0
4.2	Lagdeling B	8	3	0,5	Med kælder	0
4.3	Lagdeling C	8	3	0,5	Med kælder	0
4.4	Lagdeling D	8	3	0,5	Med kælder	0
4.5	Medium	8	0	0	Med kælder	5
4.6	Medium	8	0	0	Med kælder	-5
4.7	Lagdeling A	8	0	0	Med kælder	5
4.8	Lagdeling A	8	0	0	Med kælder	-5
4.9	Lagdeling B	8	0	0	Med kælder	5
4.10	Lagdeling B	8	0	0	Med kælder	-5
4.11	Lagdeling C	8	0	0	Med kælder	5
4.12	Lagdeling C	8	0	0	Med kælder	-5
4.13	Lagdeling D	8	0	0	Med kælder	5
4.14	Lagdeling D	8	0	0	Med kælder	-5

4.2.5 Kildeplacering

Der er udført 4 scenarier med det formål at vurdere betydningen af VOC-kildens placering på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.8.



Figur 4.8 Model-setup anvendt ved simulering af kildeplacering.

Der er udført scenarier med 4 forskellige placeringer af VOC-kilden i forhold til bebyggelsen. VOC-kilden har i forhold til de andre scenarier, hvor der anvendes en uendelig kilde placeret på grundvandsspejlet, en afgrænset størrelse på 30x30 m. I de 4 scenarier er VOC-kilden placeret dels i den umættede zone 3 m u.t. og dels på grundvandsspejlet 8 m u.t., idet den laterale afstand til bebyggelsen varierer fra 10 til 25 m. Alle scenarier er udført med steady-state barometertryk og et undertryk i bygningen på 5 Pa.

Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.10.

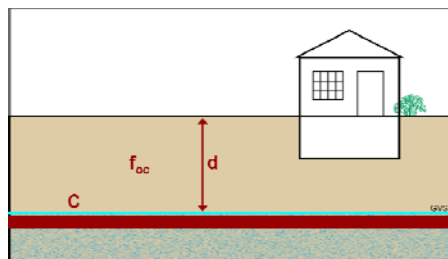
Tabel 4.10 Scenarier udført med varierende kildeplacering.

Nr.	Sand	Luft-permeabilitet [m ²]	Dybde til GVS [m]	Dybde til kilde [m]	Afstand til kilde [m]	Bebyggelse	Indendørs tryk [Pa]
5.1	Medium	1E-11	8	3	10	Med kælder	5
5.2	Medium	1E-11	8	3	25	Med kælder	5
5.3	Medium	1E-11	8	8	10	Med kælder	5
5.4	Medium	1E-11	8	8	25	Med kælder	5

4.2.6 Kildestyrke

Der er udført 8 scenarier med det formål at vurdere betydningen af VOC's kildestyrke på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.9.



Figur 4.9 Model-setup anvendt ved simulering af kildestyrke.

Betydningen af kildestyrken er simuleret ved at anvende to forskellige VOC'er med forskellige sorptionsegenskaber. Således er simuleringerne udført både med VOC1 med en $K_{oc}=190$ l/kg og VOC2 med en $K_{oc}=18,6$ l/kg, jf. tabel 4.1. Endvidere er simuleringerne udført med to forskellige indhold af organisk stof med henholdsvis $f_{oc}=0,01$, som er anvendt i alle andre scenarier, og $f_{oc}=0,001$.

Der er udført i alt 4 scenarier med konstant kildestyrke, hvor afstanden til grundvandsspejlet og indholdet af organisk stof varieres. Derudover er udført 4 scenarier med en transient kildestyrke, hvor kildestyrken varieres fra $1E6$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i de første 6 mdr. til $1E8$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i de næste 6 mdr., og til sidst til $1E7$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Simulering af transient kildestyrke udføres ligeledes med henholdsvis 3 og 8 m umættet zone og et indhold af organisk stof på 0,01 og 0,001. Alle scenarier er udført med steady-state barometertryk og neutralt tryk i bygningen. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.11.

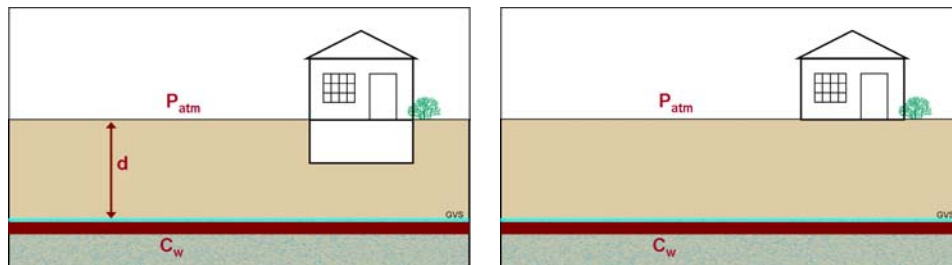
Tabel 4.11 Scenarier udført med varierende kildestyrke.

Nr.	Sand	Luft-permeabilitet [m ²]	f _{oc} [-]	Dybde til GVS [m]	Kildestyrke VOC1 [μg/m ³]	Kildestyrke VOC2 [μg/m ³]	Bebyggelse
6.1	Medium	1E-11	0,01	3	1E6	1E6	Med kælder
6.2	Medium	1E-11	0,001	3	1E6	1E6	Med kælder
6.3	Medium	1E-11	0,01	3	1E6 - 1E8	1E6 - 1E8	Med kælder
6.4	Medium	1E-11	0,001	3	1E6 - 1E8	1E6 - 1E8	Med kælder
6.5	Medium	1E-11	0,01	8	1E6	1E6	Med kælder
6.6	Medium	1E-11	0,001	8	1E6	1E6	Med kælder
6.7	Medium	1E-11	0,01	8	1E6 - 1E8	1E6 - 1E8	Med kælder
6.8	Medium	1E-11	0,001	8	1E6 - 1E8	1E6 - 1E8	Med kælder

4.2.7 Aerob nedbrydning

Der er udført i alt 4 scenarier med det formål at vurdere betydningen af biologisk nedbrydning på poreluftkoncentrationen.

Scenarierne er udført med et standard model-setup som vist på figur 4.10.



Figur 4.10 Model-setup anvendt ved simulering af biologisk nedbrydning.

Alle scenarier er udført med VOC3, der nedbrydes aerobt med en 1. ordens nedbrydningskoefficient på $\lambda=0,18 \text{ d}^{-1}$, jf. tabel 4.1. Til sammenligning er der endvidere udført enkelte simuleringer med VOC3 uden nedbrydning.

Der er udført scenarier henholdsvis med kælder og uden kælder. Endvidere er afstanden til grundvandspejlet samt kildestyrken varieret. Alle scenarier er udført med steady-state barometertryk og et undertryk i bygningen på 5 Pa. Parametre anvendt i de forskellige scenarier er samlet i tabel 4.12.

Tabel 4.12 Scenarier udført med biologisk nedbrydning.

Nr.	Sand	Luft-Permeabilitet [m^2]	Dybde til GVS [m]	Kildestyrke VOC3 [mg/l]	1. ordens nedbrydning [1/time]	Bebyggelse	Indendørs tryk [Pa]
7.1	Medium	1E-11	8	200	0,18	Med kælder	5
7.2	Medium	1E-11	8	200	0,18	Uden kælder	5
7.3	Medium	1E-11	3	200	0,18	Med kælder	5
7.4	Medium	1E-11	8	20	0,18	Med kælder	5

4.3 Model-setup

Der er anvendt tre forskellige typer modeldomæner til de opstillede scenarier. Hovedparten af scenarierne er udført med et modeldomæne på 24x24 m og med en dybde på henholdsvis 3 eller 8 m, idet atmosfæren udgør den øvre modelrand og grundvandspejlet den nedre modelrand. Dette domæne er anvendt i alle scenarier udført med bebyggelse og en uendelig VOC-kilde placeret ved grundvandspejlet. Enkelte scenarier er udført uden bebyggelse, og her er anvendt et mindre modeldomæne på 10x10 m. Endelig er scenarier udført med en afgrænset VOC-kilde udført i et modeldomæne på 70x100 m.

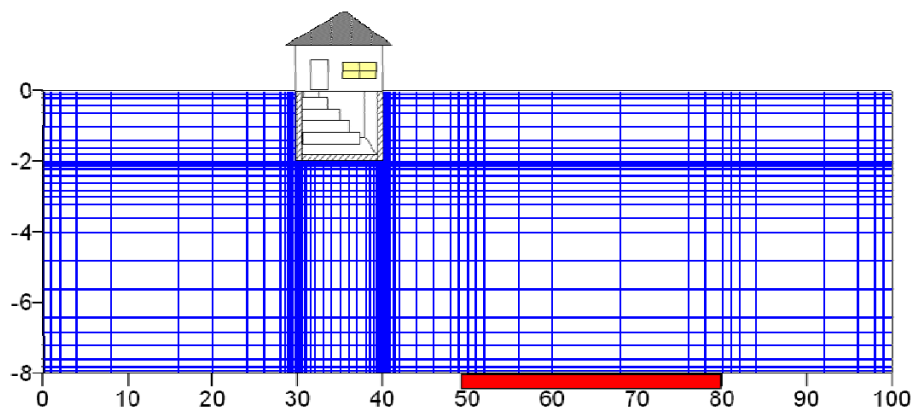
I alle scenarier med en uendelig VOC-kilde placeret ved grundvandspejlet er det ved simuleringen udnyttet, at modeldomænet er symmetrisk omkring bygningen. Således er simuleringen udelukkende udført på $\frac{1}{4}$ del af det samlede modeldomæne med symmetrilinie igennem bygningen. Scenarierne

udført med en afgrænset VOC-kilde har ikke samme symmetri, og her er simuleringen udført for hele modelområdet.

Modelområdet er diskretiseret med finere celleinddeling omkring randbetingelserne ved terræn og grundvandsspejl samt omkring sprækken i fundamentet. Eksempel på denne diskretisering fremgår af figur 4.11 for modelområdet anvendt med en afgrænset VOC-kilde.

Langs den øvre modelrand specificeres atmosfæretrykket, idet der enten anvendes et konstant tryk eller en sinusvariation givet ved en amplitude og periode. Inde i bygningen angives bygningens tryk i forhold til atmosfæretrykket, idet trykket følger samme variation som atmosfæretrykket. Langs alle andre modelrande antages en no-flow randbetingelse.

I scenarier med VOC-kilden placeret på grundvandsspejlet angives en kildestyrke som nedre randbetingelse. I den resterende del af domænet antages en startkoncentration på 0. Dette gælder endvidere inde i bygningen samt ved terræn, hvor der således ikke tages hensyn til et eventuelt baggrundsniveau. Ved simulering af aerob nedbrydning antages en konstant iltkoncentration langs den øvre modelrand og i selve modelområdet på 20 vol%.



Figur 4.11 Model-setup og diskretisering anvendt i scenarier med en afgrænset VOC-kilde.

Der er udført modelsimuleringer både som steady-state løsninger og som transiente simuleringer med varierende atmosfæretryk eller kildestyrke. Abreu og Johnson's model simulerer en transient løsning af transportligningerne, og steady-state scenarierne er således opnået ved at køre modellen i tilstrækkelig lang tid til en steady-state løsning er fundet. Denne er karakteriseret ved at være konstant i tid, således at poreluftprofilet er fuldt udviklet og fordelingen imellem faser er i ligevægt. For flere af steady-state simuleringerne er præsenteret poreluftresultater, der viser den tidslige udvikling af koncentrationsprofilet imod steady-state løsningen.

4.3.1 Præsentation af modelresultater

Modellen simulerer poreluftkoncentrationen i jordmatricen samt inde i bygningen. For at sammenligne resultaterne er poreluftkoncentrationen normaliseret i forhold til kildekonzentrationen. Modelresultaterne er således præsenteret som normaliserede dimensionsløse konturplots mellem 0 og 1, hvor 1 svarer til kildekonzentrationen. Poreluftkoncentrationen er præsenteret

i 2D konturplots, dels i vertikale tværsnit igennem bygningen og dels som horisontale plansnit ved en given dybde under terræn.

Modellen simulerer koncentrationen inde i bygningen under antagelse af et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$. Baseret på resultatet, beregnes en dæmpningsfaktor α , defineret ved forholdet mellem koncentrationen målt inde i bygningen og kildekonzentrationen /Johnson og Ettinger, 1991/:

$$\alpha = \frac{C_{\text{indendørs}}}{C_{\text{kilde}}}$$

Dæmpningsfaktoren angiver således den andel af kildekonzentrationen, der kan måles inde i bygningen. Høje α -værdier (dvs. værdier tæt på 1) angiver således, at en stor andel af kildekonzentrationen kan måles indendørs, hvilket indikerer en lille dæmpning.

For transiente simuleringer er den tidlige udvikling af poreluft-konzentrationen simuleret i udvalgte monitoringspunkter i modeldomænet. For domæner, der inkluderer bebyggelse, er koncentrationen simuleret i tre monitoringspunkter med placering henholdsvis umiddelbart under bygningen (MP1), umiddelbart under sprækken (MP2) samt ved siden af bygningen (MP3), jf. figur 4.12. Derudover er koncentrationen simuleret i tre monitoringspunkter (MP4,MP5,MP6) placeret 5 meter væk fra bygningen og i varierende dybde, afhængig af modeldomænet. For domæner uden bygning er der placeret 4-5 monitoringspunkter med varierende afstand fra terræn, jf. figur 4.13. Placeringen af monitoringspunkterne, angivet som x,z koordinater, fremgår af tabel 4.13, idet x=0 og z=0 er angivet i domænets øverste venstre hjørne.

Tabel 4.13 Koordinater (x,z) for monitoringspunkter.

Monite- rings- punkt	Domæne med bygning				Domæne uden bygning			
	z=8 m		z=3 m		z=8 m		z=3 m	
	X [m]	z [m]	X [m]	z [m]	x [m]	z [m]	X [m]	z [m]
MP1	0,0	2,1	0	2,1	5,0	0,5	5,0	0,5
MP2	4,875	2,1	4,875	2,1	5,0	1,5	5,0	1,0
MP3	5,25	1,5	5,25	1,5	5,0	3,0	5,0	1,5
MP4	10,0	1,5	10	1,5	5,0	7,0	5,0	2,8
MP5	10,0	4,0	10	2,1	5,0	7,8	-	-
MP6	10,0	7,8	10	2,8	-	-	-	-

For at kunne sammenligne den tidlige variation i de enkelte monitoringspunkter mellem de enkelte scenarier er det nødvendigt at anvende et fast mål for den beregnede variation. Hvor variationen i et punkt skyldes atmosfæretrykkets variation, der er givet ved en sinuskurve, har de beregnede tidsserier tilnærmelsesvis samme form. For hver tidsserie vil der således findes en maksimalværdi (C_{max}), en minimalværdi (C_{min}) og en middelværdi (C_{middel}). Den absolutte variation i koncentrationen (β) kan således udtrykkes ved følgende udtryk:

$$\beta = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{middel}}}{C_{\text{middel}}} * 100\% , \text{ idet } C_{\text{middel}} = \frac{C_{\text{max}} + C_{\text{min}}}{2}$$

Et andet mål for variationen kan udtrykkes ved faktoren (δ), der beskriver det absolutte forhold mellem maksimalværdien (C_{\max}) og minimalværdien (C_{\min}), og faktoren er givet ved følgende udtryk:

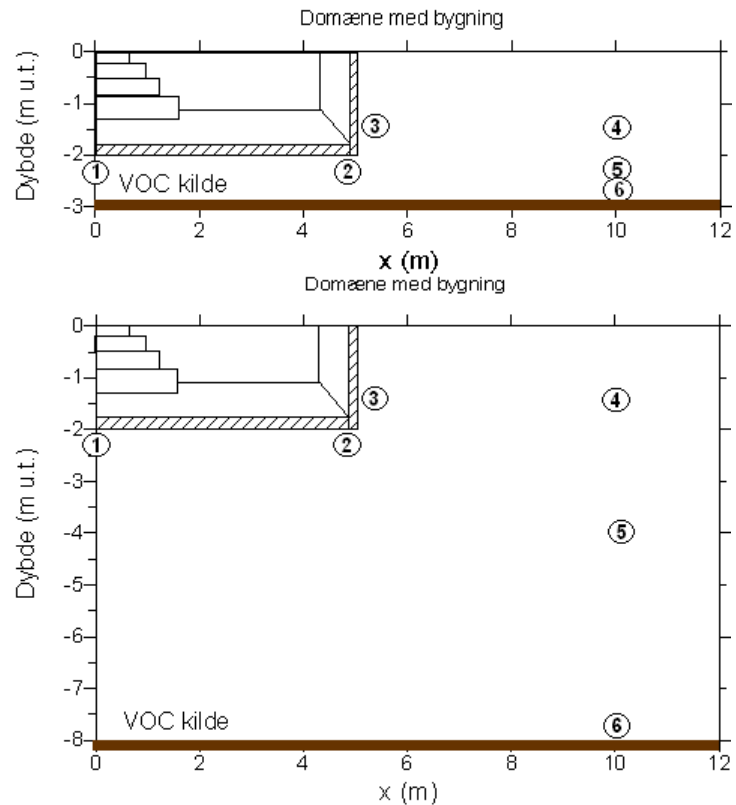
$$\delta = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}$$

I tabel 4.14 er vist sammenhængen mellem den absolutte variation (β) og faktoren (δ) for en række tidsserier. En absolut variation på ca. 1% ses at svare til en faktor på 1,01, mens en absolut variation på ca. 82% svarer til en faktor på 10. Endelig vil en faktor på 1000 svare til en absolut variation på ca. 99,8%.

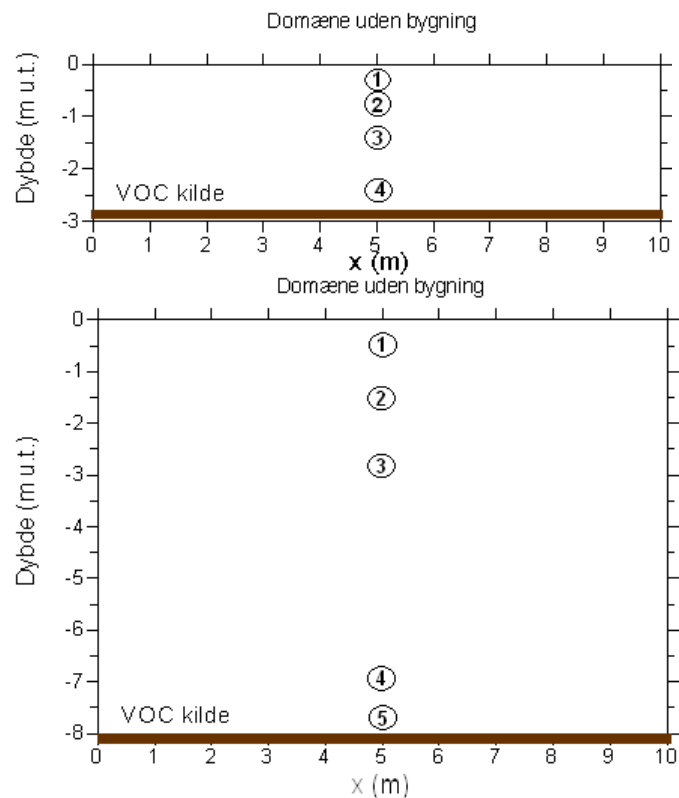
Tabel 4.14 Sammenhæng mellem den absolutte variation (β) og faktoren (δ) for forskellige sammenhørende koncentrationsværdier i en række tidsserier.

-	Enhed	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7
C_{\max}	[g/m ³]	1	1,02	1,1	2	10	50	1000
C_{\min}	[g/m ³]	1	1	1	1	1	1	1
C_{middel}	[g/m ³]	1	1,01	1,05	1,5	5,5	25,5	500,5
δ	[-]	1	1,02	1,1	2	10	50	1000
β	[%]	0,0	1,0	4,8	33,3	81,8	96,1	99,8

Den absolutte variation og faktoren er kun beregnet for de simuleringer, hvori der indgår varierende atmosfæretryk, idet simuleringer med konstant atmosfæretryk resulterer i konstante værdier i monitoringspunkterne uden nogen tidslig variation (steady-state).



Figur 4.12 Monitoringspunkter anvendt i model domæner med bebyggelse med henholdsvis 3 m og 8 m umættet zone.



Figur 4.13 Monitoringspunkter anvendt i model domæner uden bebyggelse.

5 Modelresultater

5.1 Introduktion til præsentation af modelresultater

Resultaterne fra de opstillede modelscenarier er for hver af de 7 grupper samlet i bilag A til G. Afhængig af hvilken type simulering, der er udført – transient eller steady-state – og hvilken type parametre, der er varieret, er forskellige resultater præsenteret. Resultaterne inkluderer bl.a. porelufttryk, flow ind og ud af terræn, flow ind og ud af bygning, 2D normaliserede koncentrationsprofiler, koncentrationsudvikling i udvalgte monitoringspunkter og inde i bygningen, samt bygningens dæmpningskoefficient.

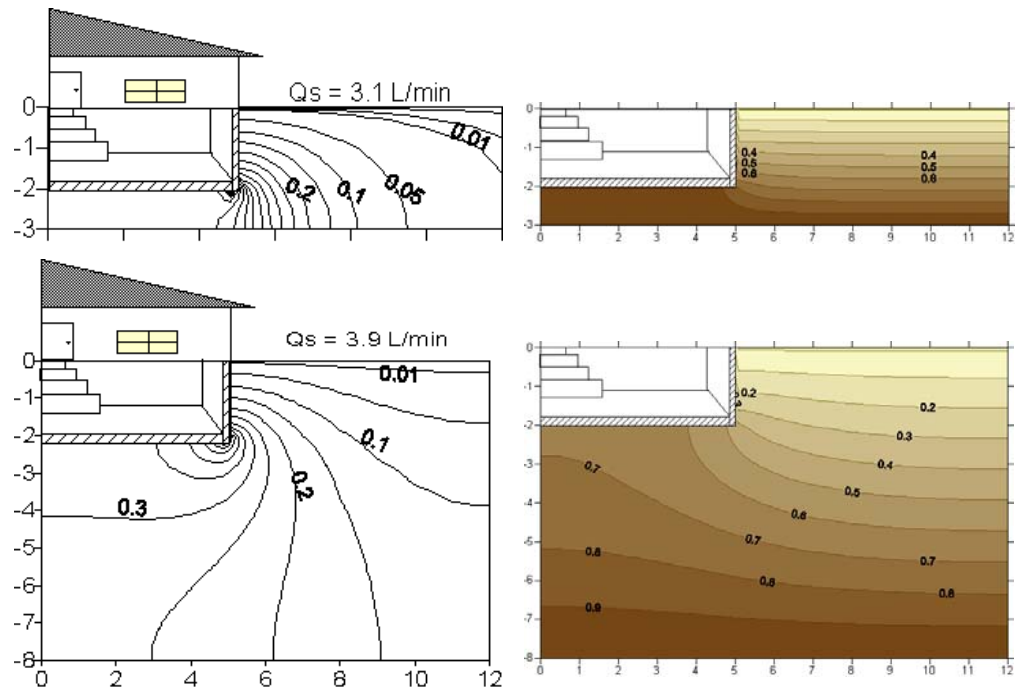
Resultaterne fra hvert scenarie vil ikke blive beskrevet i detaljer i nærværende rapport. I stedet fokuseres på at sammenligne forskellige scenarier for at vurdere, hvilken betydning de enkelte parametre har for variationen i poreluftkoncentrationen. Inden denne sammenligning vil de væsentligste processer med betydning for poreluftkoncentrationen kort blive beskrevet i nærværende afsnit.

Poreluften transporteres fra kilden ved en kombination af diffusion, styret af koncentrationsforskelle, og eventuel advektion, styret af trykforskelle. Omkring en bebyggelse vil poreluftkoncentrationen ofte være større under bygningen end målt i tilsvarende dybde væk fra bygningen. Denne effekt ses for alle simuleringer med homogent sand og en uendelig VOC-kilde placeret under bygningen. Forskellen skyldes, at den diffusive fortynding, der sker med ren atmosfærisk luft i den øverste del af jordmatricen, ikke har samme fulde effekt under bygningen som i det åbne landskab. Ved undertryk i bygningen dannes endvidere en advektiv transport mod bygningen, som yderligere kan øge poreluftkoncentration under bygningen.

Trykforskellen mellem bygningen og jordmatricen dannes pga. temperaturforskelle, vindpåvirkning og forskellige former for ventilation. Et eksempel på simuleret trykfordeling i poreluften er præsenteret i figur 5.1 for henholdsvis et højtliggende grundvandsspejl placeret 3 m u.t. og et lavtliggende grundvandsspejl 8 m u.t. Simuleringen er udført med et undertryk i bygningen på 5 Pa i forhold til atmosfæretrykket og en sprække langs fundamentets periferi. Endvidere er den tilhørende simulerede steady-state poreluftkoncentration vist for begge scenarier, angivet som normaliserede værdier mellem 0-1.

Figuren viser, hvorledes der omkring sprækken i fundamentet dannes en trykgradient, således at poreluften transporteres mod sprækken vinkelret på de optegnede konturer. Luftflowet ind i sprækken, Q_s , er angivet på figuren for begge scenarier, og det ses, at flowet ind i sprækken øges, når tykkelsen af den umættede zone øges.

Det normaliserede poreluftprofil viser tydeligt, at koncentrationen er større under bygningen end i en tilsvarende dybde uden for bygningens influenszone. Dette er især udtalt ved et dybereliggende grundvandsspejl.



Figur 5.1 Trykfordeling og normaliserede poreluftkoncentrationer omkring bygning for henholdsvis 3 m umættet zone (øverst) og 8 m umættet zone (nederst). Poreluften transporteres vinkel ret på de optegnede trykkonturer med retning mod fundamentsprækken. Begge scenarier er simuleret med 5 Pa undertryk i bygningen ifht. atmosfæretrykket.

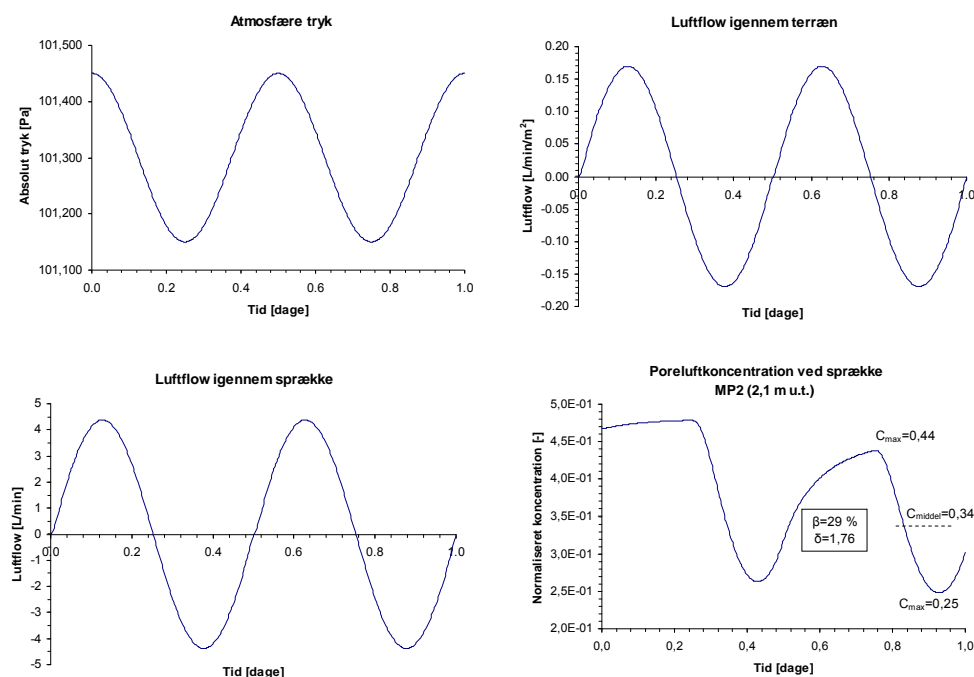
Ved transient variation i barometertrykket og dermed også trykket inde i bygningen vil den advective transport øges dels igennem terrænoverfladen og dels igennem fundamentsprækken.

Eksempel på, hvorledes luftflowet varierer ved transient barometertryk, er vist i figur 5.2 for et scenarie med en barometeramplitude på 300 Pa og en periode på 12 timer.

Variationen i barometertrykket medfører en trykforskel mellem atmosfæren og terræn, hvorved der skabes et luftflow over terræn og igennem sprækken i fundamentet. I perioden, hvor trykket falder, dannes dels et luftflow igennem terrænoverfladen med retning mod atmosfæren og dels et luftflow igennem sprækken, hvorved poreluft fra jordmatricen transporteres ind i bygningen. Omvendt, når barometertrykket stiger, strømmer ren luft fra atmosfæren ned i jordmatricen og ren luft fra bygningen transporteres ud igennem sprækken i fundamentet. Denne transport betyder en variation dels i poreluftkoncentrationen målt i jordmatricen og dels en variation i indendørskoncentrationen.

Som eksempel på denne variation er poreluftkoncentrationen umiddelbart uden for fundamentsprækken vist på figur 5.2. Heraf fremgår det, hvorledes poreluftkoncentrationen aftager, når trykket begynder at stige, idet renere luft fra bygningen fortynder koncentrationen i området omkring sprækken. Beregningen af den tidlige variation i koncentrationen i beregningspunktet MP2 er illustreret, og den absolutte variation (β) og faktoren (δ) er estimeret til hhv. 29% og 1,76.

Den tidslige variation i poreluftkoncentrationen i de udvalgte beregningspunkter MP1-MP4 samt koncentrationen i selve bygningen er anvendt ved beregning af den absolutte variation (β) og faktoren (δ).



Figur 5.2 Luftflow igennem terræn og sprække ved transient barometertryk samt poreluftkoncentrationen ved fundamentsprække. Vurderingen af den tidslige variation udtrykt ved den absolutte variation (β) og faktoren (δ) er illustreret for beregningspunkt MP2.

5.2 Barometervariation

Betydningen af varierende barometertryk på poreluftkoncentrationen er simuleret ved 4 scenarier med bygning (scenarie 1.1-1.4) og 8 scenarier uden bygning (1.5-1.12). Resultaterne fra samtlige scenarier er samlet i bilag A.

Hovedparten af scenarierne er som nævnt udført uden bebyggelse, idet det således var muligt at simulere større variationer i barometertrykket end i scenarier med bebyggelse. Ved sammenligning af scenarierne er det muligt at vurdere betydningen af barometeramplitude og barometerperiode, dybde af umættet zone samt sandtype for variationen i poreluften under transient barometertryk. Endvidere kan scenarierne udført med bebyggelse anvendes til vurdering af betydningen af bebyggelse på poreluftvariationen.

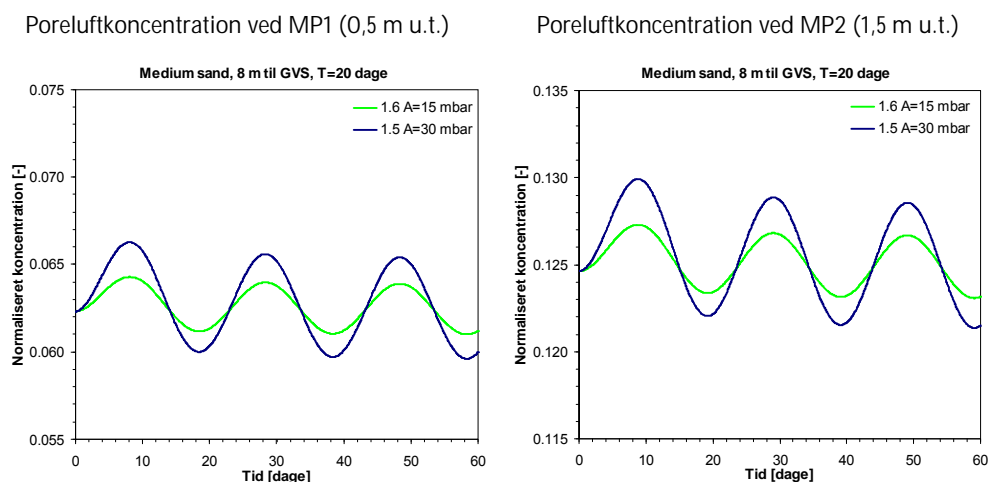
Variationen af barometertryk er endvidere simuleret i scenarierne udført med indendørstryk, sprækkeplacering og geologisk lagdeling. Resultaterne heraf er beskrevet i afsnit 5.2-5.4.

5.2.1 Betydning af barometeramplitude og -periode

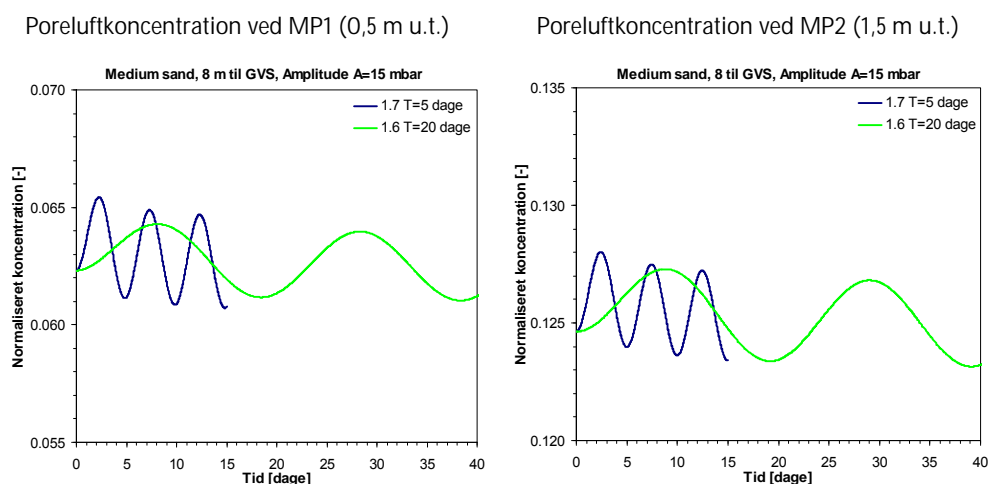
Scenarier (1.5,1.6,1.7) udført med henholdsvis forskellig barometeramplitude og forskellig barometerperiode er sammenlignet i figur 5.3 og 5.4.

Figureerne viser, at variationen i barometertrykket generelt giver variationer i poreluftkoncentrationen i både 0,5 m u.t. og 1,5 m u.t. Variationen øges som

forventet, når barometeramplituden øges (figur 5.3). Derimod ses hurtige barometersvingninger (lille periode) at give samme størrelsesorden-variation i poreluftkoncentrationen i såvel 0,5 og 1,5 m u.t. (figur 5.4).



Figur 5.3 Poreluftkoncentration simuleret henholdsvis 0,5 m u.t. (til venstre) og 1,5 m u.t. (til højre) for barometeramplituder på 15 mbar og 30 mbar. For begge scenarier er anvendt medium fint sand med grundvandsspejl 8 m u.t. og en barometerperiode på 20 dage.



Figur 5.4 Poreluftkoncentration simuleret henholdsvis 0,5 m u.t. (til venstre) og 1,5 m u.t. (til højre) for barometerperioder på 5 dage og 20 dage. For begge scenarier er anvendt medium fint sand med grundvandsspejl 8 m u.t. og en barometer-amplitude på 15 mbar.

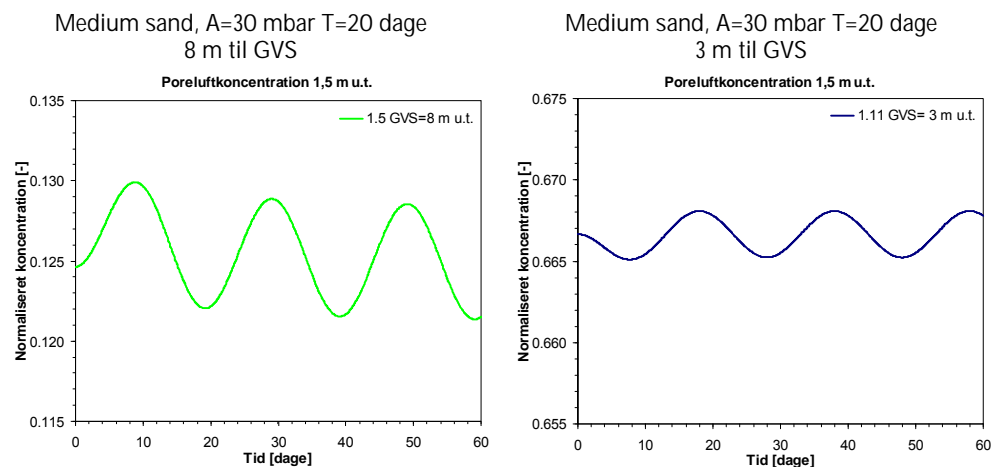
Den tidlige variation er for alle 3 scenarier (1.5,1.6,1.7) og beregningspunkterne (MP1, MP2) er mindre end $\beta = 6\%$ og $\delta = 1,128$.

5.2.2 Betydning af dybde til grundvand og VOC-kilde

Betydningen af dybden til grundvandsspejlet og dermed også til VOC-kilden er simuleret for medium fint sand med en barometeramplitude på 30 mbar og en periode på 20 dage.

Forskellen i poreluftkoncentrationen i 1,5 m u.t. for henholdsvis et dybtliggende grundvandsspejl i 8 m u.t. og et højtliggende grundvandsspejl i 3 m u.t. er sammenlignet i figur 5.5. Poreluftkoncentrationen er som forventet størst, når kilden er placeret tæt på terræn (3 m u.t.). Den største variation ses

også som forventet for det dybereliggende grundvandsspejl og således med en stigende tykkelse af den umættede zone. Forøgelsen af den umættede zone fra 3 til 8 m medfører samtidig en forøgelse af den maksimale luftmængde, der strømmer ind og ud gennem terræn, fra 0,175 til 0,5 l/m²/time.

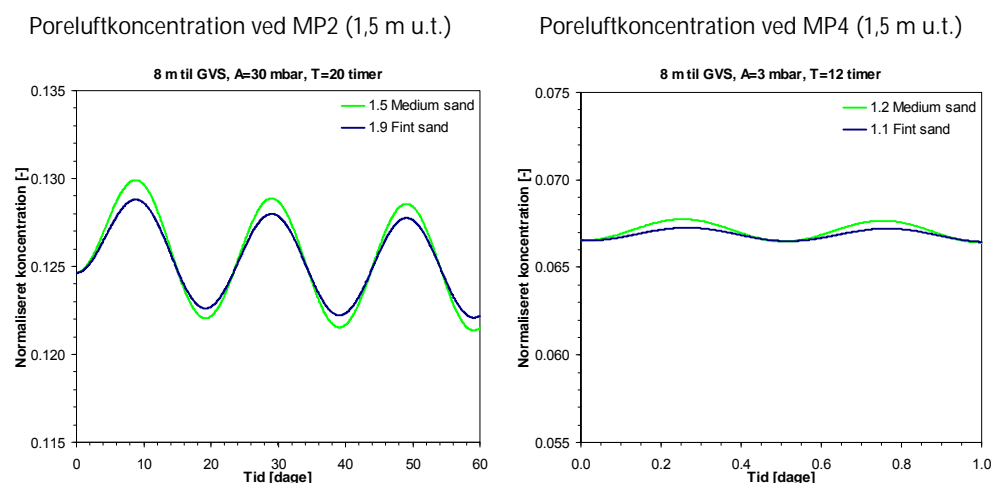


Figur 5.5 Poreluftkoncentration simuleret for medium fint sand med grundvandsspejl henholdsvis 8 m u.t. (til venstre) og 3 m u.t. (til højre). For begge scenarier er anvendt en barometeramplitude på 30 mbar og en barometerperiode på 20 dage.

Den tidlige variation for scenarie 1.5 i beregningspunktet 1,5 m u.t. er mindre end $\beta = 5,4\%$ og $\delta = 1,114$. For scenarie 1.11 er den tilsvarende variation mindre end $\beta = 0,2\%$ og $\delta = 1,005$.

5.2.3 Betydning af sandtype

Betydningen af sandtype ved variation af barometertrykket er vurderet ved at sammenligne simuleringer udført med samme barometervariation, men med henholdsvis fint og medium fint sand. I figur 5.6 er variationen i poreluftkoncentrationen sammenlignet for fint og medium fint sand for en barometervariation på henholdsvis 30 mbar og en periode på 20 timer og en barometervariation på 3 mbar og en periode på 12 timer.



Figur 5.6 Poreluftkoncentration simuleret for forskellige sandtyper 1,5 m u.t. Venstre: En barometeramplitude på 30 mbar og en periode på 20 timer. Højre: En barometeramplitude på 3 mbar og en periode på 12 timer. I alle scenarier er der anvendt en dybde af grundvandsspejl på 8 m u.t.

Resultaterne viser, at barometervariationen relativt set har mindre betydning i fint sand end i medium fint sand. Årsagen hertil er den lavere gaspermeabilitet i det fine sand. Det ses også, at den tendens er gældende for de to meget forskellige barometervariationer, der er anvendt.

Den tidlige variation i beregningspunktet MP2 (1,5 m u.t.) for de to scenarier (1.5,1.9) med den største amplitude og periode er hhv. $\beta = 5,4\%$ og $\beta = 2,4\%$. Tilsvarende for de to scenarier (1.1,1.2) med den mindste amplitude og periode er $\beta = 0,9\%$ hhv. $\beta = 0,6\%$. De tilhørende faktorer (δ) er for alle scenarier mindre end $\delta = 1,114$.

5.2.4 Betydning af bebyggelse

Der er udført 4 scenarier med bebyggelse for at vurdere betydningen af barometervariation for poreluftkoncentrationen omkring en bygning med kælder. Scenarierne er alle, pga. modeltekniske begrænsninger, udført med betydelig mindre barometervariation end scenarierne udført uden bebyggelse. Således er scenarierne med bebyggelse udført med en barometeramplitude på 3 mbar og en periode på 12 timer, hvorimod scenarierne uden bebyggelse er udført med op til 50 mbar og en periode på 20 dage (jf. tabel 4.6). Som vist i figur 5.3, vil større barometeramplitude medføre større variation i poreluftkoncentrationen. Den simulerede variation i poreluften omkring en bygning forventes derfor at være større ved kraftigere barometervariationer.

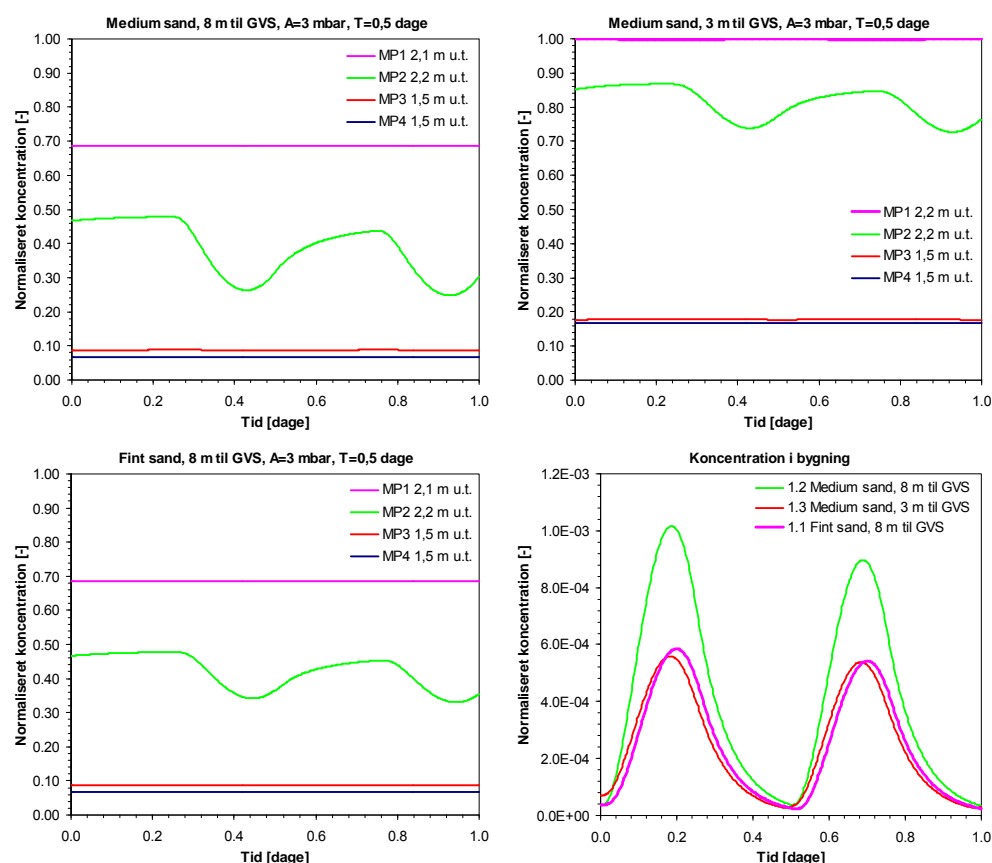
Den tidlige variation i poreluftkoncentration for 4 udvalgte beregningspunkter er vist i figur 5.7 for henholdsvis medium sand med grundvandsspejl hhv. 3 m u.t. og 8 m u.t. og fint sand med grundvandsspejl 8 m u.t. Punkterne inkluderer et punkt midt under bygningen (MP1), et punkt ved fundamentsprækken (MP2), et punkt ved siden af bygningen (MP3) og et punkt uden for bygningens influenszone (MP4), jf. figur 4.14. Udover de beregnede poreluftkoncentrationer, viser figur 5.7 også den beregnede tidlige variation af koncentrationen i bygningen.

Det bemærkes indledningsvist, at skalaen for den normaliserede koncentration er mellem 0 og 1, hvor 1 modsvarer den koncentration, der findes ved kilden nær grundvandet. Det eneste målepunkt, der for den givne barometervariation viser en tydelig variation i poreluftkoncentration (optegnet med denne skala), er MP2 placeret umiddelbart uden for fundamentsprækken. Dette skyldes, som nævnt tidligere, at variationen i barometertrykket skaber en advektiv strømning igennem sprækken, hvorved luft transporteres henholdsvis fra jordmatricen og ind i bygningen, når trykket falder, og fra bygningen og ud i jordmatricen, når trykket stiger. Derved transporteres renere luft fra bygningen ud i jordmatricen, som fortynder poreluftkoncentrationen omkring sprækken. Den største variation ses for medium sand, hvor gaspermeabiliteten er høj og for en dyb umættet zone, hvor andelen af luft, der kan transporteres, er stor.

De øvrige monitoringspunkter (MP1,MP3,MP4) viser ingen synlig variation (optegnet med denne skala) som følge af den påtrykte barometervariation. Dette gælder også MP1, der er beliggende midt under bygningen, idet der ikke sker nogen betydende advektiv transport.

Monitoringspunkterne MP3 og MP4 viser også kun meget små forskelle i de beregnede absolutte koncentrationsniveauer, med størst forskel for scenarierne med den tykkeste umættede zone. Da der samtidig ikke ses nogen tydelig

forskel i den tidlige variation mellem punkterne, ser det således ikke ud til, at huset i sig selv har nogen markant betydning for koncentrationerne her.



Figur 5.7 Poreluftkoncentration simuleret for monitoringspunkter omkring bygningen for henholdsvis medium sand og fint sand samt simuleret koncentration inde i bygningen.

På baggrund af de simulerede koncentrationer i scenarierne, er der i tabel 5.1 vist den absolutte variation (β) beregnet for hvert af de 4 monitoringspunkter samt for koncentrationen i bygningen. Den absolutte variation for monitoringspunkt MP2 er mellem 7,6% og 27% - og størst for scenarie 1.2 med det mest permeable materiale og den tykkeste umættede zone. Den maksimale absolutte variation på $\beta=27,0\%$ har en tilhørende faktorværdi på $\delta=1,74$. Af de øvrige monitoringspunkter har MP1 midt under huset den laveste absolutte variation ($\beta<0,2\%$). Monitoringspunkterne MP3 og MP4 viser omtrent den samme absolutte variation ($\beta<0,9\%$), og dette bekræfter det visuelle indtryk fra figur 5.7 og vurderingerne ovenfor.

Tabel 5.1 Sammenstilling af den absolutte variation (β) for samtlige beregningspunkter (MP1-MP4) samt i bygningen for scenarierne (1.1,1.2,1.3). Enhed (%).

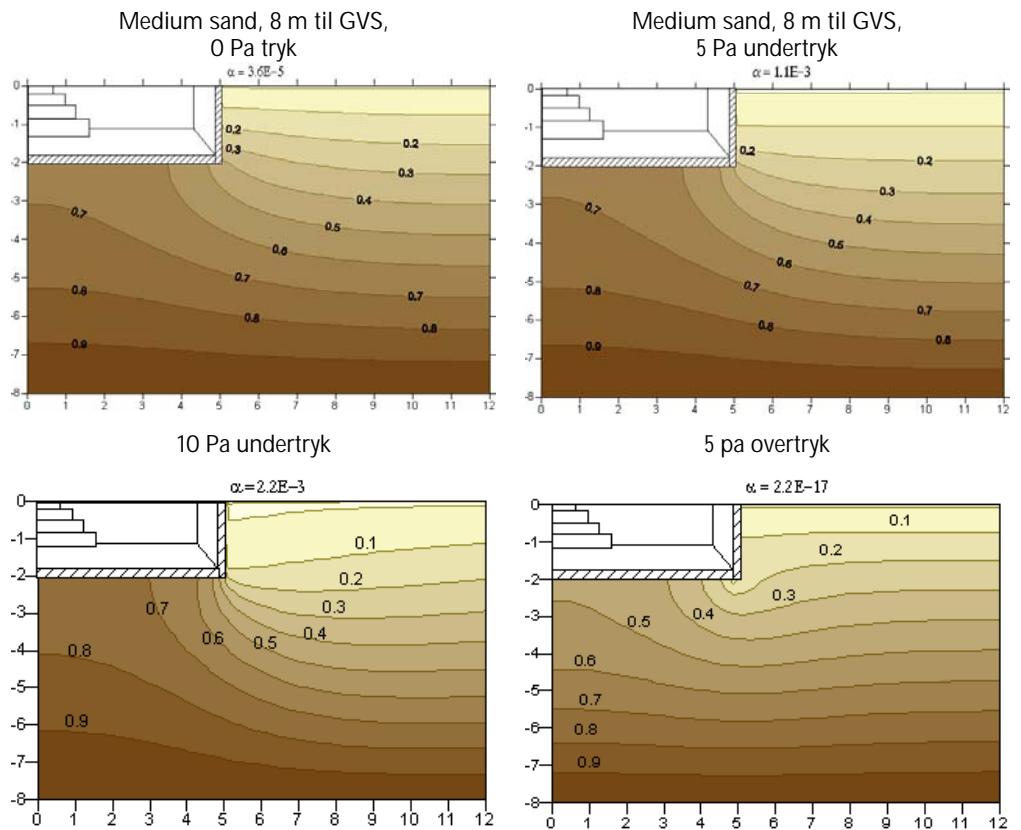
Scenarie	MP1	MP2	MP3	MP4	Bygning
1.1	0,1	15,2	0,5	0,6	89,6
1.2	0,1	27,0	0,9	0,9	91,6
1.3	0,2	7,6	0,3	0,3	89,1

De simulerede koncentrationer i bygningen viser en tydelig variation for alle 3 scenarier – og med den største variation for scenarie 1.2. Den absolutte

variation i koncentrationen i bygningen varierer mellem 89,1% og 91,6%, jf. tabel 5.1. Den tilhørende variation i faktoren (δ) er fra ca. 17 til 23.

5.3 Indendørs tryk

Betydningen af trykket inde i bygningen på poreluftkoncentrationen er simuleret i 4 scenarier (scenarie 2.1-2.4). Resultaterne fra simuleringerne er samlet i bilag B. Steady-state koncentrationsprofiler for henholdsvis neutralt tryk, 5 Pa undertryk, 10 Pa undertryk og 5 Pa overtryk er sammenlignet i figur 5.8.



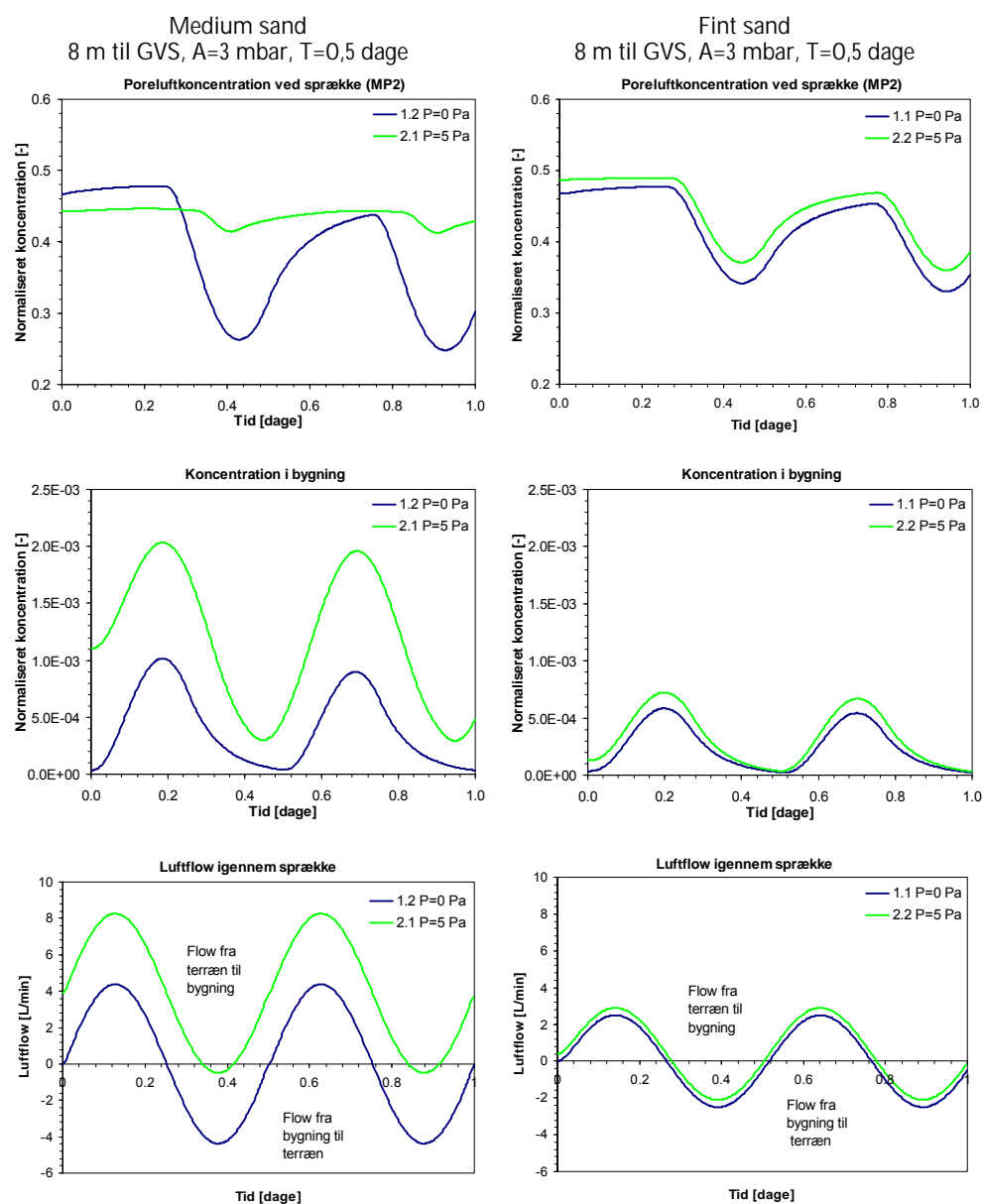
Figur 5.8 Normal iserede steady-state poreluftkoncentrationer simuleret med varierende indendørstryk på henholdsvis 0 Pa, 5 Pa undertryk, 10 Pa undertryk og 5 Pa overtryk.

Ved undertryk i bygningen på henholdsvis 5 Pa og 10 Pa ses højere poreluftkoncentration under bygningen end for scenariet med neutralt tryk. Undertrykket betyder imidlertid også, at der ved advektiv transport trækkes mere ren luft ned igennem terrænoverfladen, hvorved koncentrationen i den øvre del af den umættede zone fortyndes. Samlet giver den øgede advective transport ind i bygningen en stigning i indendørskoncentrationen på ca. 30-60 gange, idet dæmpningsfaktoren øges fra $3,6E-5$ til henholdsvis $1,1E-3$ og $2,2E-3$ ved et undertryk på 5 og 10 Pa. Den indendørs koncentration stiger dog kun marginalt, når undertrykket i bygningen øges fra 5 til 10 Pa, hvilket som nævnt skyldes, at det øgede undertryk også vil trække ren luft ned, som fortynder poreluftkoncentrationen omkring sprækken.

Ved overtryk i bygningen på 5 Pa ses koncentrationen under bygningen og omkring sprækken at være betydelig mindre end ved neutralt tryk. Dette skyldes, at den rene luft fra bygningen, der transporteres ud igennem sprækken i fundamentet, fortynder poreluftkoncentrationen.

Indendørskoncentration reduceres herved kraftigt, og således reduceres dæmpningsfaktoren fra $3,6E-5$ ved neutralt tryk til $2,2E-17$ ved et overtryk på 5 Pa, svarende til en reduktion af indendørskoncentrationen på ~ 12 størrelsesordener.

For de transiente simuleringer med en barometervariation på 3 mbar og en periode på 12 timer er variationen i poreluftkoncentrationen sammenlignet for henholdsvis neutralt tryk og 5 Pa undertryk i figur 5.9. Sammenligningen er udført for henholdsvis medium sand og fint sand, begge med et dybtliggende grundvandsspejl 8 m u.t.



Figur 5.9 Poreluftkoncentration i MP2, koncentration i bygningen og luftflow igennem sprækken simuleret for henholdsvis neutralt tryk inde i bygningen og 5 Pa undertryk. Venstre: Medium sand, Højre: Fint sand.

For medium sand ses effekten af at variere indendørstrykket tydeligt på poreluftkoncentrationen målt ved fundamentalsprækken. Ved neutralt tryk varierer poreluftkoncentrationen ved sprækken ($\beta < 27\%$), idet koncentrationen aftager, når barometertrykket stiger og der transporteres luft fra bygningen og ud i jordmatricen. Ved undertryk i bygningen foregår hovedparten af

transporten fra jordmatricen til bygningen (se flow igennem sprække i figur 5.9). Dette betyder, at koncentrationen umiddelbart uden for sprækken ikke fortyndes i samme grad som når bygningen har neutralt tryk, og variationen i poreluftkoncentration er dermed mindre ved sprækken ($\beta < 3,4\%$). Det samlede flow ind i bygningen er imidlertid større ved undertryk i bygningen, og den beregnede koncentration i bygningen bliver derfor højere.

I fint sand med mindre gaspermeabilitet medfører et undertryk i bygningen kun en begrænset øget advektiv transport igennem sprækken (<20%). Forskellen i simuleret poreluftkoncentration for scenarier ved henholdsvis neutralt tryk og 5 Pa undertryk er derfor minimal, og variationen mellem de to er under 2%.

Tyrkforskellen mellem bygningen og atmosfæren kan således have betydelig effekt dels på poreluftkoncentrationen i jordmatricen og dels for koncentration inde i bygningen, idet effekten er størst i højpermeabelt sand. Ved transient barometertryk betyder undertrykket i bygningen, at der ses mindre variation i poreluftkoncentrationen i jordmatricen, men at den beregnede gennemsnitskoncentration i bygningen bliver større (ca. 2,5 gange).

5.4 Sprækkeplacering

Betydningen af sprækkeplaceringen i fundamentet er simuleret i 4 scenarier (scenarie 3.1-3.4). Resultaterne fra simuleringerne er samlet i bilag C.

Forskellen i steady-state poreluftkoncentrationen for scenarier med henholdsvis sprække langs periferi og sprække langs både periferi og midten af fundament er sammenlignet i figur 5.10. Simuleringerne er alle udført med medium sand og 8 m til grundvandsspejlet. Koncentrationsprofilen er vist for henholdsvis neutralt indendørstryk, 5 Pa undertryk og 5 Pa overtryk.

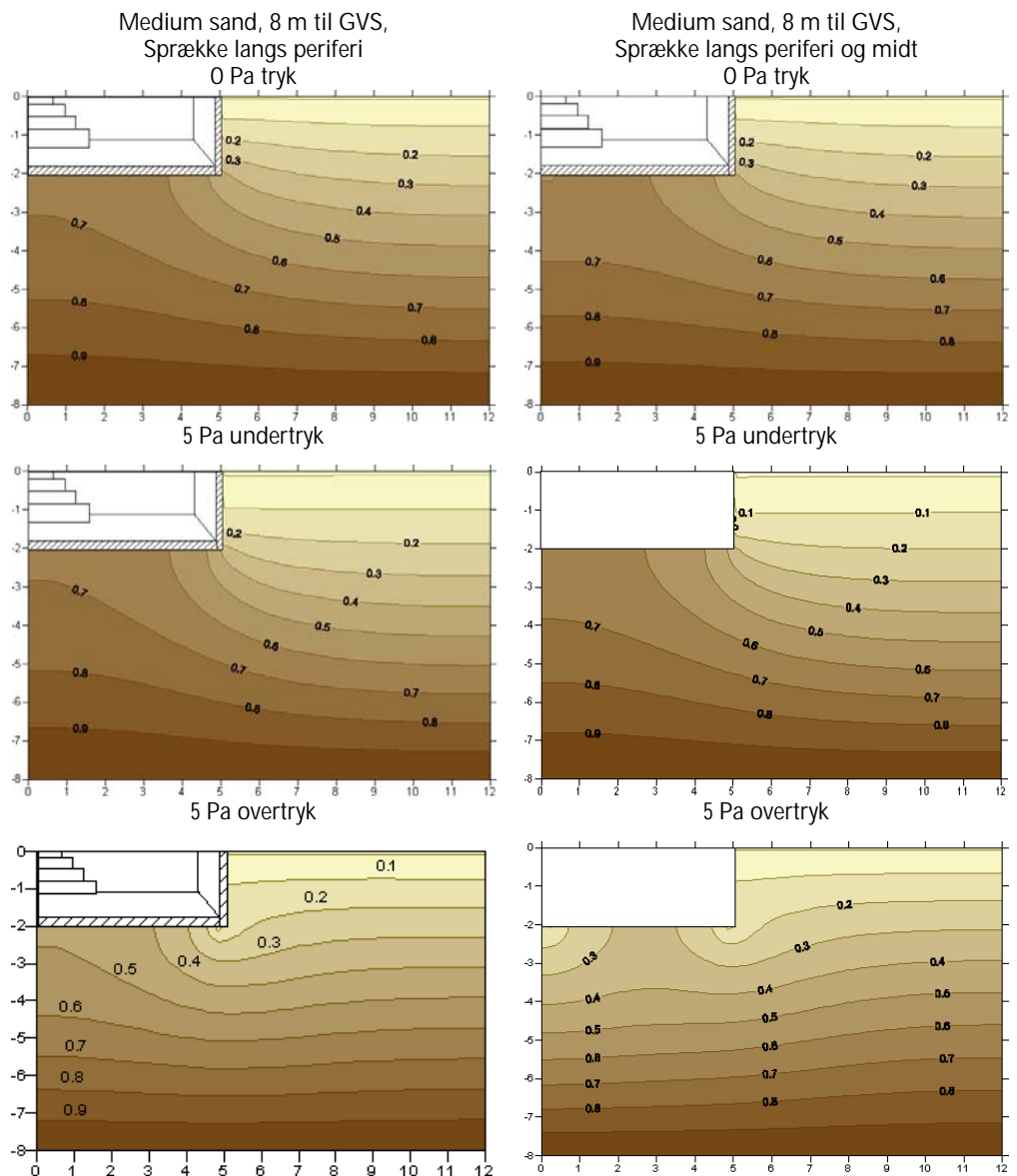
Poreluftprofilerne viser, at koncentrationen under bygningen bliver mindre ved tilstedeværelsen af en ekstra sprække midt i fundamentet. Effekten af den reducerede koncentration er størst ved overtryk i bygningen, idet ren luft her transporteres ud i jordmatricen og fortynder poreluftkoncentrationen kraftigt under bygningen. Også ved undertryk i bygningen reduceres koncentrationen under bygningen pga. den øgede horisontale advektive transport langs bygningens underside mod sprækken i midten af bygningen.

For scenarierne med transient barometertryk er variationen i poreluftkoncentrationen med henholdsvis en sprække langs periferi og sprækker langs både periferi og midte af fundament vist i figur 5.11, idet alle scenarier er udført med medium sand, 8 m til grundvandsspejl og neutralt tryk i bygningen.

Figuren viser, at den største forskel i poreluftkoncentrationen ses midt under bygningen (MP1), hvor tilstedeværelsen af en sprække betyder, at poreluftkoncentrationen varierer, når ren luft fra bygningen transporteres ud i jordmatricen under stigende barometertryk. Koncentrationen ved sprækken langs bygningens periferi er minimalt påvirket af den ekstra sprække midt i fundamentet.

Effekten af barometervariationen er som i tidligere scenarier størst i medium sand med den største permeabilitet. Gennemsnitskoncentrationen i bygningen bliver større, når der inkluderes en ekstra sprække midt i fundamentet, idet

den største stigning ses for scenariet med det højpermeable sand i forhold til scenariet med det fine sand.

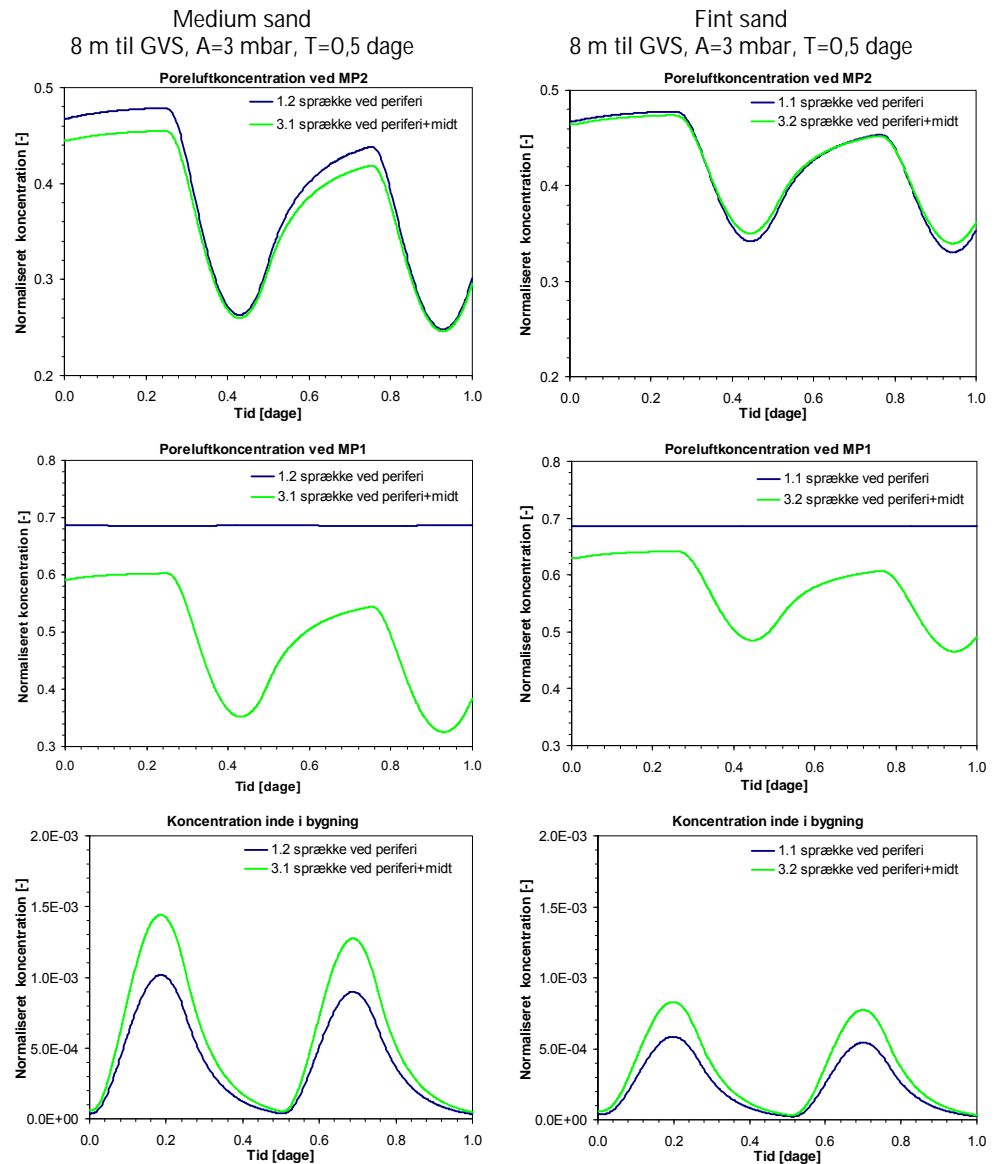


Figur 5.10 Normaliserede Steady-state pore luftkoncentrationer simuleret henholdsvis med sprække langs periferi af fundament (venstre) og sprækker langs både periferi og midt af fundament (højre). Øverst: Neutralt indendørstryk, Midt: 5 Pa undertryk, Nederst: 5 Pa overtryk.

På baggrund af de simulerede koncentrationer i scenarierne, er der i tabel 5.2 vist den absolutte variation (β) beregnet for hvert af de 2 monitoringspunkter samt for koncentrationen i bygningen.

Tabel 5.2 Sammenstilling af den absolutte variation (β) for beregningspunkterne (MP1,MP2) samt i bygningen for scenarierne (1.1,1.2,3.1,3.3). Enhed (%).

Scenarie	MP1	MP2	Bygning
1.1	0,1	15,2	89,6
1.2	0,1	27,0	91,6
3.1	25,0	25,6	90,8
3.2	12,7	13,9	90,8



Figur 5.11 Scenarier med sprække langs fundamentets periferi og sprækker langs fundamentets periferi og midte. Simuleringerne er udført for både medium sand (til venstre) og fint sand (til højre). Øverst: Koncentrationen ved bygningens periferi i MP2, Midt: Koncentration under bygningens midte ved MP1, Nederst: Koncentration i bygningen.

Den absolutte variation (β) for monitoringspunkt MP2 reduceres fra 15,2% til 13,9% ved introduktion af den ekstra sprække. Derimod ses som forventet en væsentlig ændring i variationen for MP1, der ved introduktionen af den ekstra sprække får en tidslig variation på mellem 12,7% og 25%, hvilket er sammenligneligt med, hvad der observeres i MP2. Den absolutte variation i koncentrationen i bygningen varierer mellem 89,6% og 91,6%, jf. tabel 5.2. Den tilhørende variation i faktoren (δ) er fra ca. 18 til 23.

5.5 Geologisk lagdeling

Betydningen af geologisk lagdeling på poreluftkoncentrationen er simuleret i 14 scenarier (scenarie 4.1-4.14) med 4 forskellige typer geologisk lagdeling. Resultaterne fra simuleringerne er samlet i bilag D.

De 4 lagdelinger, jf. figur 4.7, er udført i medium sand med indslag af mindre permeable lag. Lagdelingerne inkluderer:

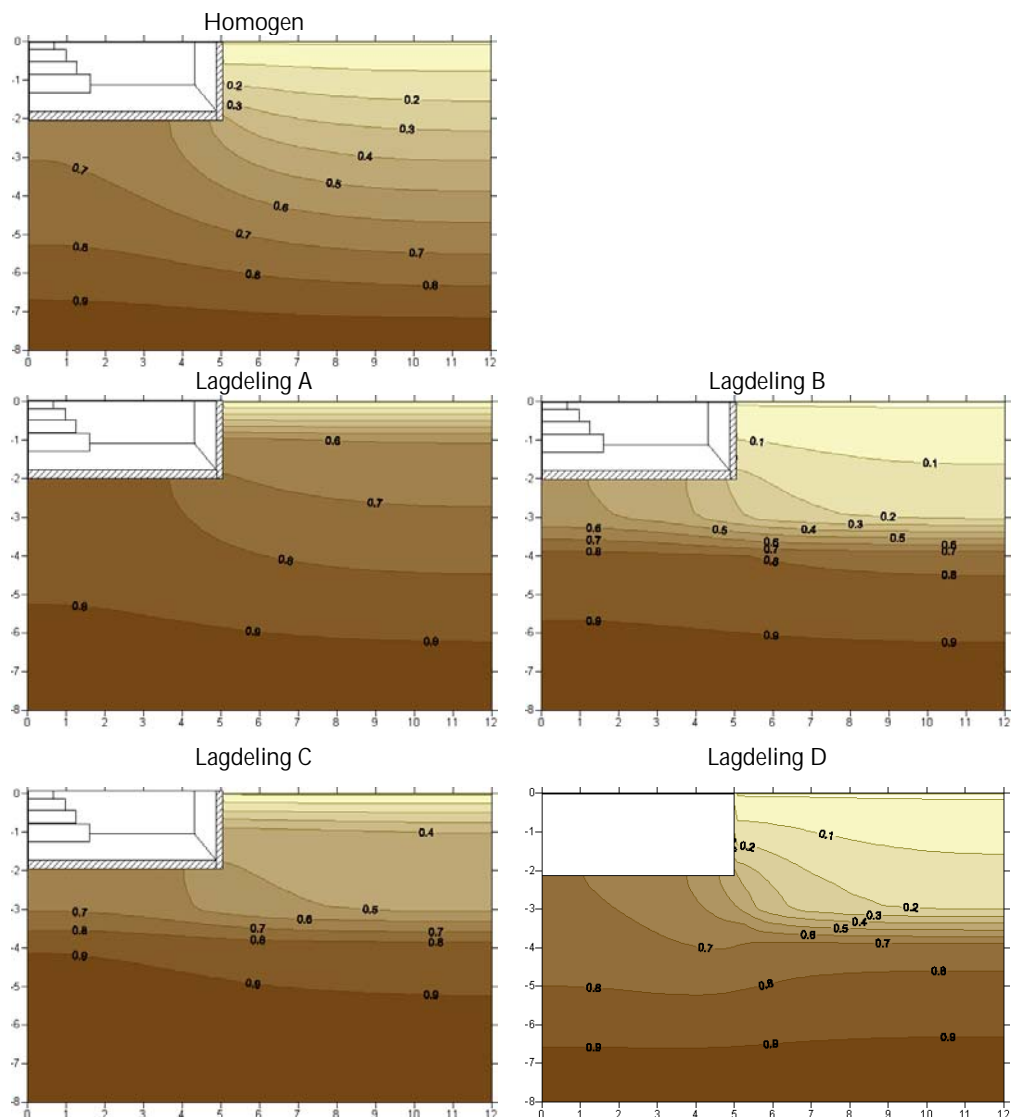
Lagdeling A: Lavpermeabelt lag fra 0-1 m u.t.

Lagdeling B: Lavpermeabelt lag fra 3-4 m u.t.

Lagdeling C: Lavpermeabelt lag fra 0-1 m u.t. og 3-4 m u.t.

Lagdeling D: Lavpermeabelt lag fra 3-4 m u.t. med åbning under bygningen

De beregnede steady-state poreluftkoncentration for de 4 lagdelinger er samlet i figur 5.12 og sammenlignet med koncentrationsprofilen simuleret for homogent medium sand. Alle scenarier er udført med grundvandsspejlet i 8 m u.t.



Figur 5.12 Normaliserede Steady-state poreluftkoncentrationer simuleret med de 4 forskellige lagdelinger (A-D). Den normaliserede poreluftkoncentration for homogent medium sand er inkluderet til sammenligning.

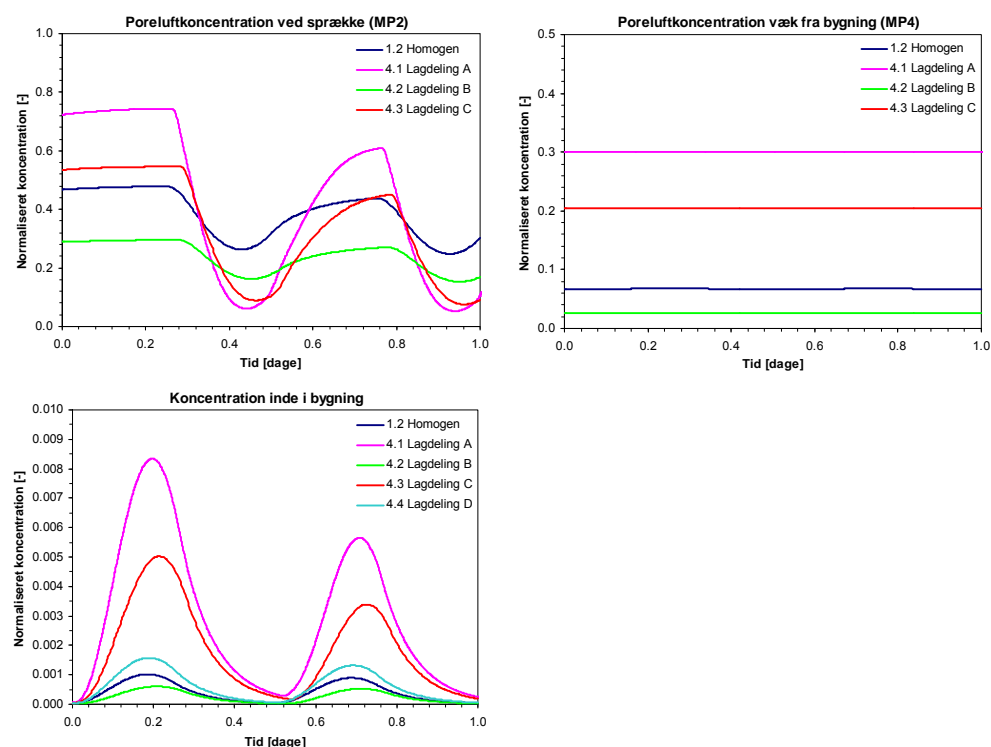
De simulerede poreluftprofiler viser, at geologisk lagdeling eller anden form for inhomogenitet har betydning for poreluftkoncentrationen i en given dybde. Med et lavpermeabelt lag mod terræn (lagdeling A) bliver poreluftkoncentrationen under laget betydeligt højere end simuleret under homogene forhold, eftersom der ikke sker samme fortynding med atmosfærisk

luft. Denne effekt ses, dog i mindre grad, endvidere for lagdeling C, hvor der er simuleret et lavpermeabelt lag både ved terræn og imellem bygningen og VOC-kilden.

Er det lavpermeable lag placeret 3-4 m u.t. (lagdeling B), bliver koncentrationen over laget betydelig mindre, idet diffusionen igennem laget begrænser transporten fra kilden mod terræn, men ren luft kan stadig transporteres fra terræn og ned i jordmatricen. Ved en åbning i det lavpermeable lag under bygningen (lagdeling D) bliver poreluftkoncentrationen under bygningen større, men koncentrationen i jordmatricen over det lavpermeable lag er stadig lav, hvilket resulterer i en kraftig koncentrationsgradient omkring bygningens periferi.

Betragtes de beregnede normaliserede poreluftkoncentrationer direkte under fundamentet, ses, at der selv for den gennemgående lagdeling B beregnes værdier mellem 0,3 og 0,6. Den introducerede lagdeling vil således reducere den opadrettede diffusive flux noget, men samtidig skabe en meget kraftig vertikal koncentrationsgradient henover det lavpermeable lag.

Betydningen af transient barometertryk ved forskellige lagdelinger er vist i figur 5.13. Variationen i poreluften er vist dels umiddelbart under sprækken (MP2) og dels uden for bygningens influenszone (MP4). Endvidere er variationen i indendørskoncentrationen vist. Bemærk, at for lagdeling D er poreluftvariationen ikke simuleret for MP2 og MP4.



Figur 5.13 Scenarier med forskellige lagdelinger (A-D) og samtidig barometervariation. Koncentrationen i 2,1 m u.t. ved MP2 (øverst til venstre), Koncentrationen i 1,5 m u.t. ved MP4 (øverst til højre), Nederst: Koncentrationen i bygningen. Alle scenarier med medium sand og 8 m til grundvandsspejlet samt barometer amplitude på 3 mbar og en periode på 12 timer.

På baggrund af de simulerede koncentrationer i scenarierne, er der i tabel 5.3 vist den absolutte variation (β) beregnet for hvert af de 2 monitoringspunkter samt for koncentrationen i bygningen.

Tabel 5.3 Sammenstilling af den absolutte variation (β) for beregningspunkter (MP2,MP4) og i bygningen samt det maksimale flow igennem sprækken for scenarierne (1.2,4.1,4.2,4.3,4.4).

Scenarie	MP2 [%]	MP4 [%]	Bygning [%]	Maks.flow i sprække [l/min]
1.2 Ref.	27,0	0,9	91,6	4,4
4.1 A	82,5	0,2	86,3	21,8
4.2 B	26,8	1,0	91,5	4,2
4.3 C	70,5	0,2	88,9	0,2
4.4 D			89,1	6,9

Koncentrationen i beregningspunkterne varierer betydeligt for de 4 lagdelinger. I punktet placeret væk fra bygningen (MP4) er poreluftkoncentrationen øget for de to scenarier med det lavpermeable lag ved terræn sammenlignet med homogent sand. Den laveste koncentration ses ved et lavpermeabelt lag mellem bygningen og VOC-kilden. Variationen i barometertrykket medfører en absolut variation i poreluftkoncentrationen (β) på mindre end 1%, jf. tabel 5.3.

Ved fundamentsprækken (MP2) ses større variation i poreluftkoncentrationen for scenarier med det lavpermeable lag placeret ved terræn (lagdeling A og C) end simuleret for homogent sand. Variationen i barometertrykket medfører en absolut variation i poreluftkoncentrationen (β) på op til 82,5%, jf. tabel 5.3. Dette skyldes, at fundamentsprækken er den eneste højpermeable åbning mod terræn, hvorved flowet igennem sprækken øges ved varierende barometertryk. Ved et lavpermeabelt lag mellem bygningen og VOC-kilden (lagdeling B, scenarie 4.2) ses en variation i poreluftkoncentrationen på niveau med, hvad der ses for homogent sand (scenarie 1.2). Dette skyldes, at det lavpermeable lag reducerer mængden af luft, der kan flyttes ved advektiv transport, svarende til at dybden af den umættede zone mindskes. Det maksimale luftflow igennem sprækken varierer fra 0,2 til 21,8 l/min., jf. tabel 5.3.

Koncentrationen inde i bygningen er større i scenarier med lavpermeabelt lag mod terræn, men den absolutte variation i koncentrationen er ikke meget forskellig de enkelte scenarier imellem. Den absolutte variation i koncentrationen i bygningen varierer således mellem 86,3% og 91,6%, jf. tabel 5.3. Den tilhørende variation i faktoren (δ) er fra ca. 14 til 23.

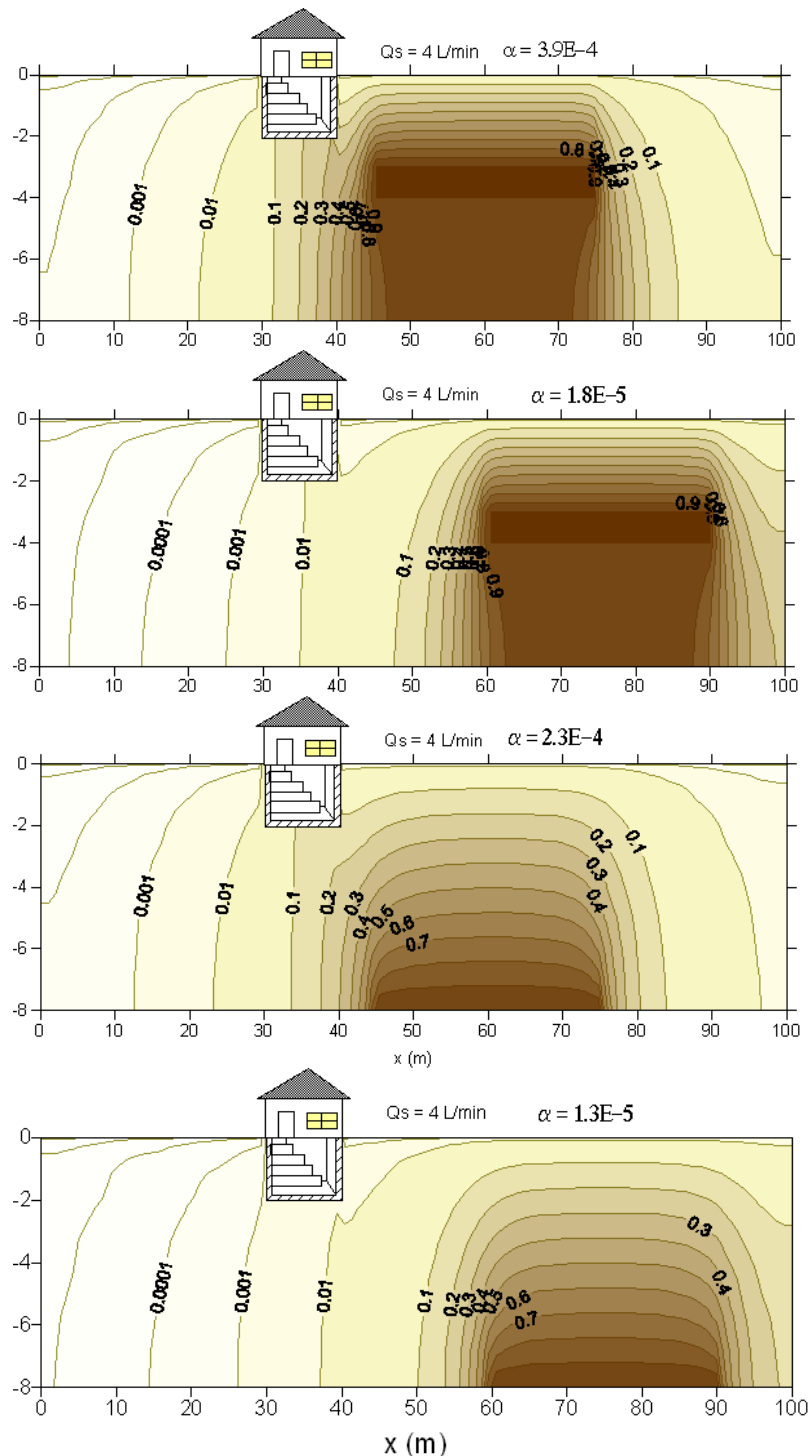
5.6 Kildeplacering

Betydningen af kildeplacering er simuleret i 4 scenarier (5.1-5.4) for en afgrænset VOC-kilde. Resultaterne fra simuleringerne er samlet i bilag E.

Steady-state poreluftprofiler for de 4 forskellige modelscenarier er vist i figur 5.14, idet poreluftkoncentrationen i horisontale plansnit endvidere er vist i bilag E. Profilerne viser, hvorledes poreluftkoncentrationen aftager væk fra VOC-kilden. For kilder placeret ved grundvandsspejlet transporteres poreluft opad og lateralt væk fra kilden. For kilder placeret tæt på terræn ses transporten op mod terræn at være dominerende i forhold til den horisontale spredning.

Dæmpningsfaktoren α ses at være meget ens for kilder placeret i samme laterale afstand fra bygningen, men med forskellig afstand til terræn. Ved en

lateral afstand på 10 m fra bygningen ses således, at $\alpha=3,9E-4$ ved en dybde til VOC-kilden på 3 m og at $\alpha=2,3E-4$ ved en dybde til kilden på 8 m. Øges den laterale afstand mellem VOC-kilde og bygningen, ses størst effekt i reduktionen af den indendørs koncentration for kilder placeret tæt på terræn. Kildeplaceringen har stor betydning for den poreluftkoncentration, der måles i en given dybde og afstand fra kilden. I en radius omkring kilden aftager koncentrationen ca. 1 størrelsesorden pr. 10 m, hvilket svarer til en reduktion i poreluftkoncentrationen målt på faktiske poreluftsager /Andersen et al., 2009/.

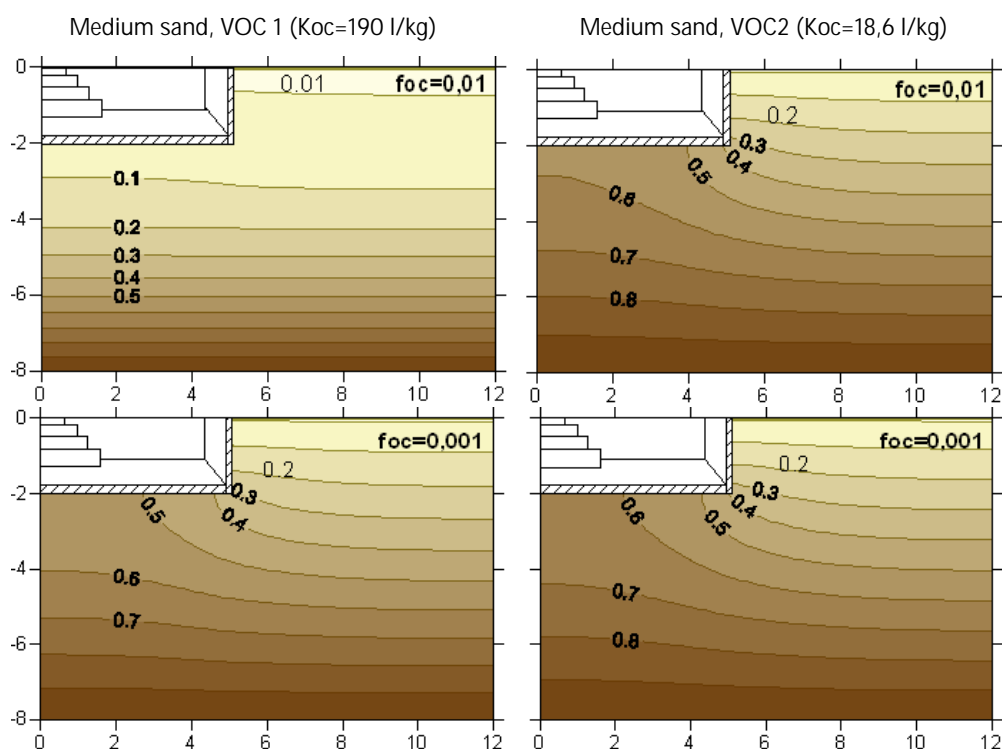


Figur 5.14. Tværsnitsprofil af poreluftkoncentrationer ved forskellig placering af VOC-kilde.

5.7 Kildestyrke

Betydningen af kildestyrken er simuleret i 8 scenarier (6.1-6.8). Ved transient kildestyrke afhænger poreluftkoncentrationen af, hvor kraftigt VOC'en sorberes til jorden. Denne retardation afhænger dels af VOC'ens sorptionskoefficient (K_{oc}) og jordens indhold af organisk stof (f_{oc}). Effekten af K_{oc} på poreluftkoncentrationen er simuleret ved at anvende to forskellige VOC'er med forskellige sorptions-koefficienter. Således har VOC1 en $K_{oc}=190$ l/kg og VOC2 en $K_{oc}=18,6$ l/kg, jf. tabel 4.1. Endvidere er effekten af f_{oc} simuleret ved at anvende medium sand med henholdsvis $f_{oc}=0,01$ og $f_{oc}=0,001$. Alle scenarier er udført med VOC-kilden placeret på grundvandsspejlet 8 m u.t. og med bebyggelse med neutralt tryk. Der er udført 4 scenarier med konstant kildestyrke, idet koncentrationsudviklingen mod steady-state er simuleret. Endvidere er udført 4 scenarier med transient kildestyrke. Resultaterne af samtlige scenarier er samlet i bilag F.

Ved simulering af steady-state er udviklingen i koncentrationsprofilerne præsenteret for udvalgte tidspunkter. 1 år efter start er koncentrationsprofilerne for henholdsvis VOC1 og VOC2, vist i figur 5.15 (andre tidspunkter fremgår af bilag F). Figuren viser, at ved høje værdier af f_{oc} og K_{oc} forsinkes den kraftige sorption udviklingen af steady-state. Dette betyder, at der ses betydelig variation i poreluftkoncentrationen målt i en given dybde og afstand.



Figur 5.15 Poreluftkoncentration simuleret efter 1 år med varierende K_{oc} og f_{oc} . Venstre: Koncentrationsprofil for VOC 1 med $f_{oc}=0,01$ øverst og $f_{oc}=0,001$ nederst. Højre: Koncentrationsprofil for VOC 2 med $f_{oc}=0,01$ øverst og $f_{oc}=0,001$ nederst.

Poreluftkoncentrationens afhængighed af sorption betyder, at når kildestyrken ændres, fx pga. blotlægning af en VOC-kilde ved faldende grundvandsspejl, kan sorptionen dæmpe, hvor hurtigt VOC'en spredes videre ved diffusion.

Denne effekt er simuleret ved at ændre kildestyrken over tid fra $1E6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ til $1E8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ og dernæst til $1E7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Simuleringerne er som for de steady-state scenarier, der er udført med to forskellige VOC- og to forskellige foc-værdier. Endvidere er simuleringen udført med såvel lavtliggende grundvandsspejl, 8 m u.t., (figur 5.16) som højtliggende grundvandsspejl (figur 5.17).

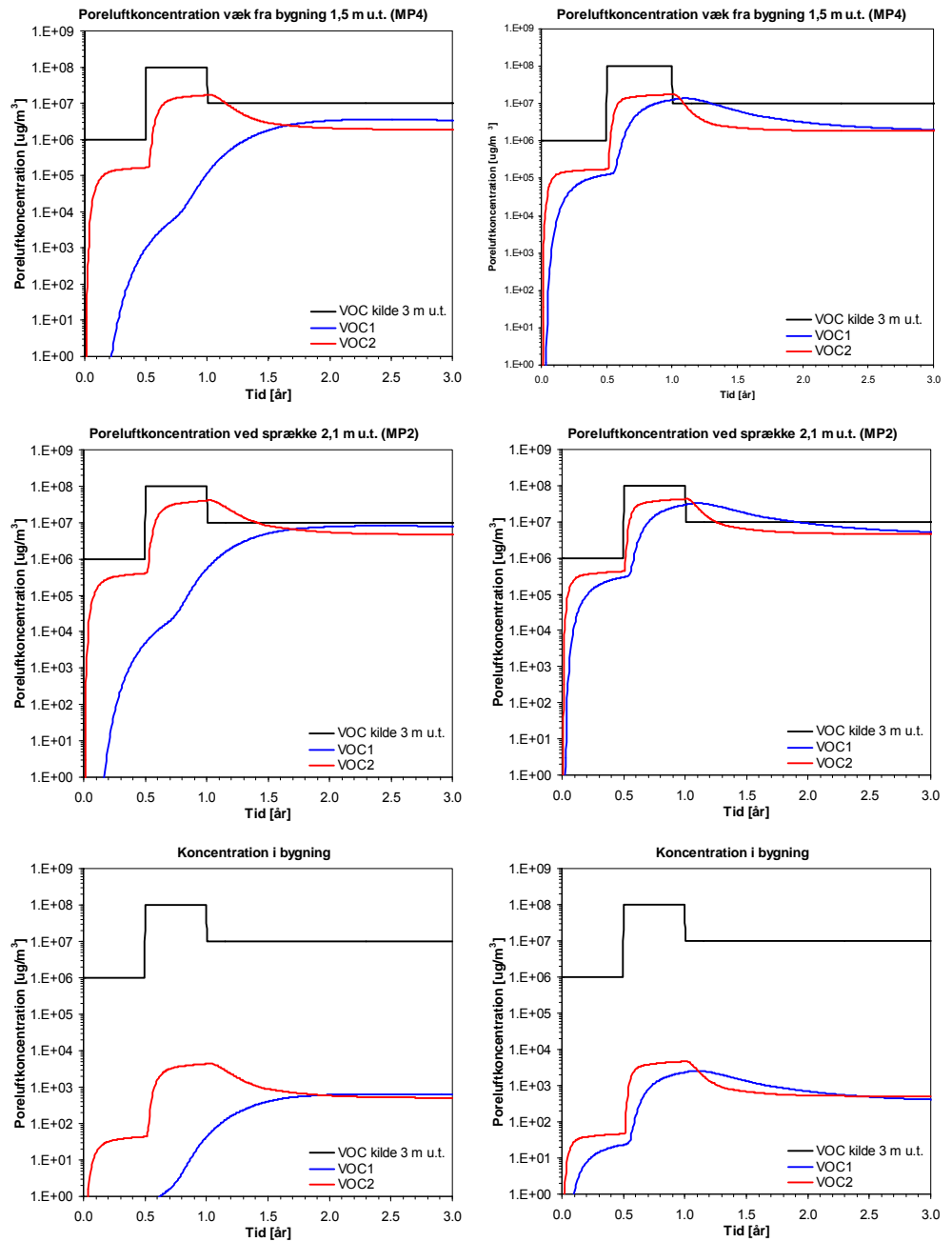
Ved lavtliggende grundvandsspejl (figur 5.16) ses dæmpningen af koncentrationsudviklingen tydeligt for VOC1 med høj Koc i sand med høj foc=0,01. Poreluftkoncentrationen for VOC1 når således ikke steady-state inden for de første 6 mdr. med en kildestyrke på $1E6$, inden kildestyrken øges. Denne dæmpning i poreluftkoncentrationen ses ikke for VOC2 med lavere Koc-værdi. Forskellen i koncentrationen mellem VOC1 og VOC2 er således flere størrelsesordener både i jordmatricen og inde i bygningen flere år efter en ændring i kildestyrken. Ved lavere foc-værdi er sorptionen mindre, og dermed bliver forskellen imellem poreluftkoncentrationen for VOC1 og VOC2 også mindre.

Ved højtliggende grundvandsspejl (figur 5.17), hvor VOC-kilden er placeret tættere på terræn, ses ikke samme dæmpning af poreluftkoncentrationen. For VOC2 med lav Koc ses poreluftkoncentrationen således at reagere næsten momentant på en ændring af kildestyrken. Kun for VOC1 med høj Koc og en høj foc-værdi ses en mindre dæmpning af koncentrationsudviklingen.

En ændring i kildestyrken for VOC'er med lav sorption (lav Koc eller lav foc) betyder nærmest momentan ændring i poreluftkoncentrationen. Dermed vil selv mindre hurtige ændringer i kildestyrken betyde variation i poreluftkoncentrationen målt i en given dybde. For VOC'er, hvor sorptionen er kraftig, medfører hurtige ændringer i kildestyrken ikke nødvendigvis en målbar variation i poreluftkoncentrationen i et givent målepunkt. Til gengæld giver den målte koncentration ikke nødvendigvis den korrekte steady-state koncentration.

Medium sand, 8 m til GVS, foc=0,01

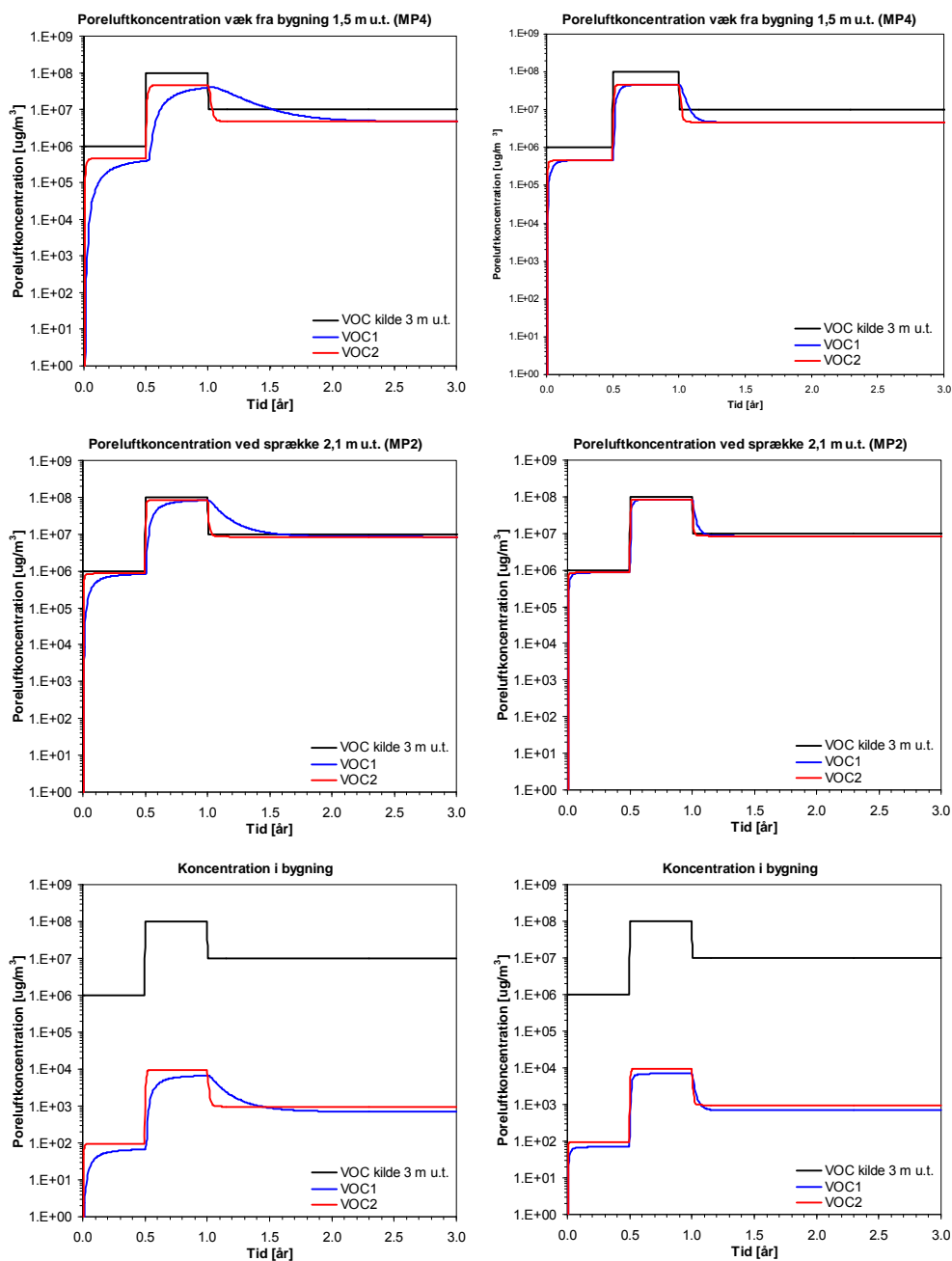
Medium sand, 8 m til GVS, foc=0,001



Figur 5.16 Udvikling i poreluftkoncentration for transient kildestyrke for Medium sand med 8 m til GVS for henholdsvis foc=0,01 (til venstre) og foc=0,001 (til højre). Øverst: Poreluftkoncentration væk fra bygning (MP4), Midt: Poreluftkoncentration ved sprækken i fundamentet (MP2), Nederst: Koncentration i bygning.

Medium sand, 3 m til GVS, foc=0,01

Medium sand, 3 m til GVS, foc=0,001



Figur 5.17 Udvikling i poreluftkoncentration for transient kildestyrke for Medium sand med 3 m til GVS for henholdsvis foc=0,01 (til venstre) og foc=0,001 (til højre). Øverst: Poreluftkoncentration væk fra bygning (MP4), Midt: Poreluftkoncentration ved sprækken i fundament (MP2), Nederst: Koncentration i bygning.

5.8 Aerob nedbrydning

Aerob nedbrydning kan kraftigt reducere poreluftkoncentrationen i jordmatricen og herved begrænse videre transport ind i en overliggende bygning. Nedbrydningen er afhængig af tilførslen af ilt fra atmosfæren, og denne transportproces får dermed afgørende betydning for, om nedbrydningen kan foregå.

Abreu og Johnson's model simulerer transport og nedbrydning af VOC simultant med transport og forbrug af ilt. Atmosfæren antages at repræsentere en uendelig stor kilde med en konstant iltkoncentration svarende til 20 vol%. Nedbrydningen af VOC antages at finde sted, så længe iltkoncentrationen er >1 vol%, hvilket svarer til en normaliseret iltkoncentration på 0,05 i de viste konturplots.

Simuleringerne er baseret på en enkeltkomponent VOC-kilde med karakteristika angivet ved VOC3 med en 1.ordens nedbrydningskoefficient på $\lambda=0,18 \text{ t}^{-1}$ (jf. tabel 4.1). Der er således ikke taget hensyn til, at blandingsforureninger med flere typer nedbrydelige VOC'er vil konkurrere om ilten. Endvidere er der ikke taget hensyn til eventuel anaerob nedbrydning i de områder, hvor ilten er brugt op.

Den aerobe nedbrydning afhænger af adskillige faktorer, som ikke alle er undersøgt i nærværende rapport. Dr. Lillian Abreu har udført adskillige simuleringer med modellen for at undersøge betydningen af de forskellige faktorer. Resultaterne heraf kan ses i /Abreu og Johnson, 2006/. I nærværende undersøgelser er udført et begrænset antal scenarier med aerob nedbrydning for at vise effekten af nedbrydning på poreluftkoncentrationen. De faktorer, der er undersøgt, inkluderer betydning af kildestyrke, betydning af dybde til grundvandsspejl og kilde samt betydningen af kælder.

Alle resultater fra scenarier udført med aerob nedbrydning (7.1-7.4) er samlet i bilag G.

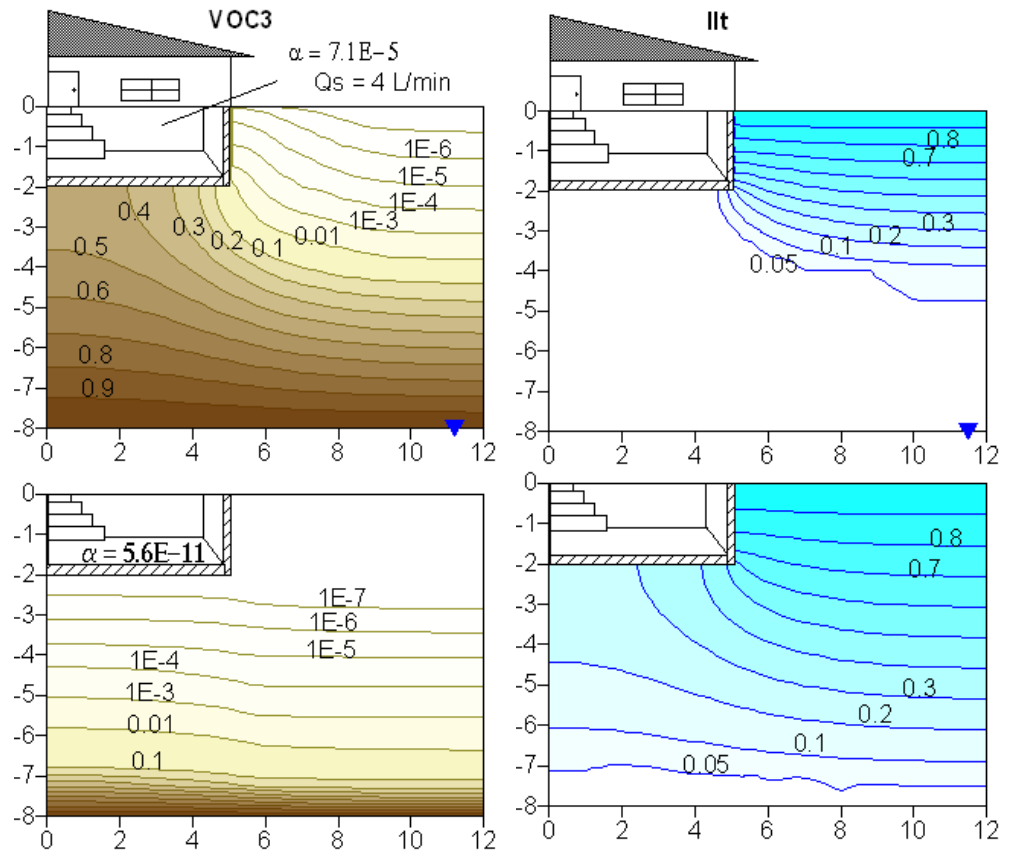
5.8.1 Betydning af kildestyrke

Kildestyrken har stor betydning for det koncentrationsprofil, der udvikler sig for aerobe nedbrydelige VOC'er. I figur 5.18 er det normaliserede koncentrationsprofil med nedbrydning for VOC3 og tilsvarende normaliserede iltprofil vist for henholdsvis en kildestyrke på $C_w=200 \text{ mg/l}$ og $C_w=20 \text{ mg/l}$, idet kildestyrken er angivet i vandfasen. Disse kildestyrker svarer omtrentlig til den opløste koncentration, der kan forventes ved tilstedeværelsen af fri fase NAPL af benzin hhv. fyringsolie. For begge scenarier er anvendt medium sand og en dybde til grundvandsspejlet på 8 m.

Koncentrationsprofilerne viser, at ved en kildestyrke på 200 mg/l opbruges ilten, inden den transporteres ind under bygningens fundament. I terræn væk fra bygningen opbruges ilten (koncentration <0,05 svarende til 1 vol%) i en dybde på ~5 m u.t. Der sker således ingen nedbrydning af VOC3 under bygningen, og poreluftkoncentrationen, der måles her, er flere størrelsesordener større end den poreluftkoncentration, der måles væk fra bygningen i tilsvarende dybde.

Ved lavere kildestyrke er iltindholdet ikke tilsvarende begrænsende, og aerob nedbrydning kan finde sted både uden for bygningens influenszone og under fundament. Poreluftkoncentrationer målt henholdsvis under bygningen og væk fra bygninger er dermed af samme størrelsesorden.

Forskellen i den aerobe nedbrydning ses ligeledes på dæmpningsfaktoren for bygningen. Således simuleres en α -værdi på $7,1E-5$ ved en kildestyrke på 200 mg/l og en α -værdi på $5,6E-11$ ved en kildestyrke på 20 mg/l, svarende til en reduktion af den indendørskoncentration på 6 størrelsesordener.



Figur 5.18 Steady-state poreluftkoncentration og iltindhold for scenarier med kildestyrker på henholdsvis 200 mg/l (øverst) og 20 mg/l (nederst). Medium sand.

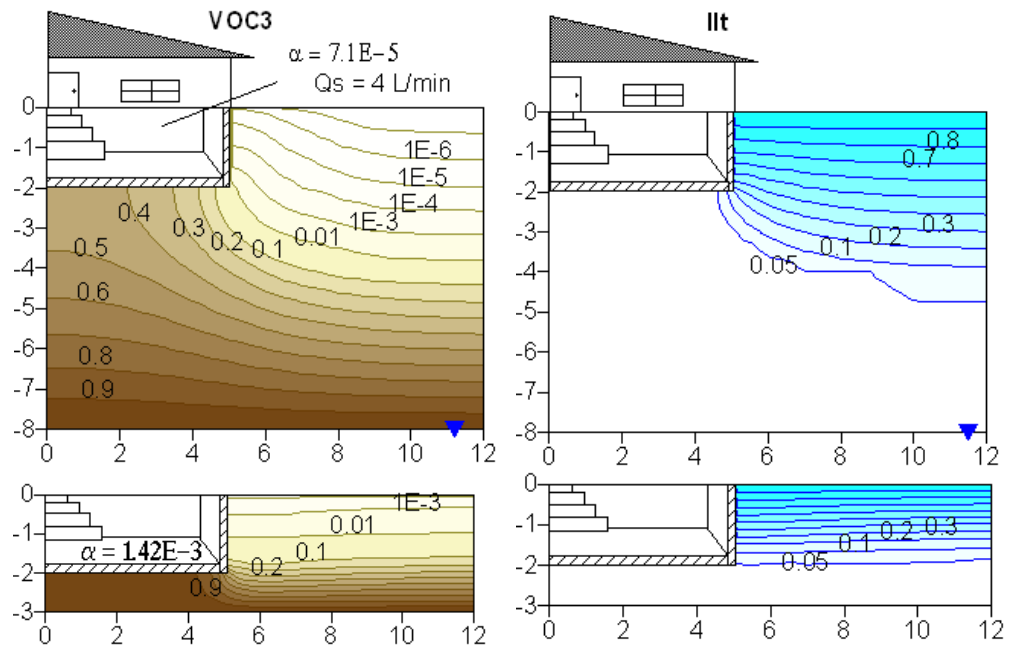
5.8.2 Betydning af dybde til grundvandsspejl og VOC-kilde

Betydningen af afstanden til grundvandsspejlet og dermed VOC-kilden for poreluftkoncentrationen med nedbrydning af VOC3 er simuleret med en dybde på henholdsvis 8 m og 3 m og høj kildestyrke (200 mg/l), figur 5.19.

Ved højtliggende grundvandsspejl (3 m u.t.) bliver ilt opbrugt i de øverste ca. 2 m af jorden omkring bygningen. Der dannes i dette dybdeinterval meget store vertikale koncentrationsgradienter for både ilt og VOC3. Der transporteres således ikke ilt ind under bygningen, og der sker ingen aerob nedbrydning. Kildestyrken under fundament reduceres således ikke. For det lavtliggende grundvandsspejl (8 m u.t.) ses en tilsvarende situation, idet ilt her ikke kan trænge dybere end ca. 3-4 m u.t., førend den bliver forbrugt ved aerob nedbrydning.

Dæmpningsfaktoren ved det højtliggende grundvandsspejl er betydelig højere ($1,4E-3$) end den tilsvarende dæmpningsfaktor simuleret ved et dybere liggende grundvandsspejl ($7,1E-5$). I de viste simuleringer skyldes denne forskel dog primært, at kildestyrken under huset øges jo tættere op under huset kilden kommer.

Nedbrydningen har generelt størst betydning ved lavtliggende grundvandsspejl, men effekten mindskes ved øget kildestyrke (se nærmere i /Abreu og Johnson, 2006/).



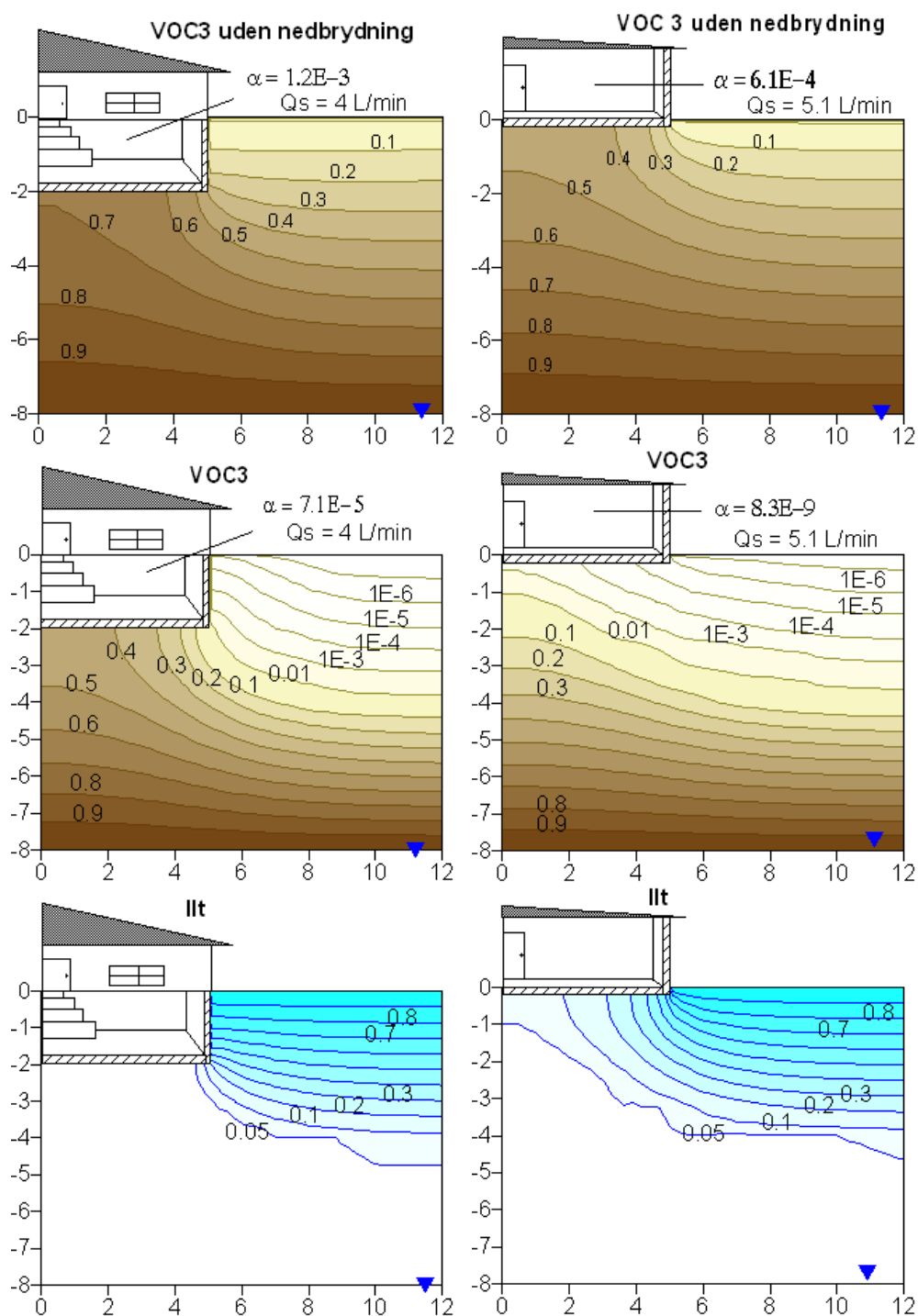
Figur 5.19 Steady-state poreluftkoncentration og iltindhold for scenarier med henholdsvis 8 m til GVS (øverst) og 3 m til GVS (nederst). Medium sand.

5.8.3 Betydning af bygningskonstruktion

Betydningen af bygningskonstruktionen er vurderet ved at simulere poreluftkoncentrationen med nedbrydning af VOC3 omkring en bygning henholdsvis med og uden kælder. For begge scenarier er anvendt homogent medium sand og et dybtliggende grundvandsspejl 8 m u.t.

Poreluftprofilen og det tilsvarende iltprofil viser, at for bygningen uden kælder transporteres ilt helt ind under fundamentet, hvorved poreluftkoncentrationen reduceres betydeligt (figur 5.20). Dette betyder, at dæmpningskoefficienten for bygningen uden kælder reduceres betydeligt fra $6,1E-4$ til $8,3E-9$ pga. den aerobe nedbrydning. For bygningen med kælder er reduktionen i dæmpningskoefficienten fra $1,2E-3$ til $7,1E-5$ pga. aerob nedbrydning. Dæmpningskoefficienten reduceres således med ca. 5 størrelsesordner uden kælder og med ca. 2 størrelsesordner med kælder. Aerob nedbrydning kan således have stor betydning for den poreluftkoncentration, der måles i en given dybde og afstand fra huset samt inde i selve bygningen.

De væsentligste faktorer, der har indflydelse på, hvor kraftig nedbrydningen er, inkluderer afstanden til kilden, kildestyrken samt om der er kælder. Endvidere har simuleringer udført af Abreu og Johnson vist, at nedbrydningskoefficienten er meget væsentlig /Abreu og Johnson, 2006/. Beregningerne er således meget følsomme over for variationer i denne parameter.

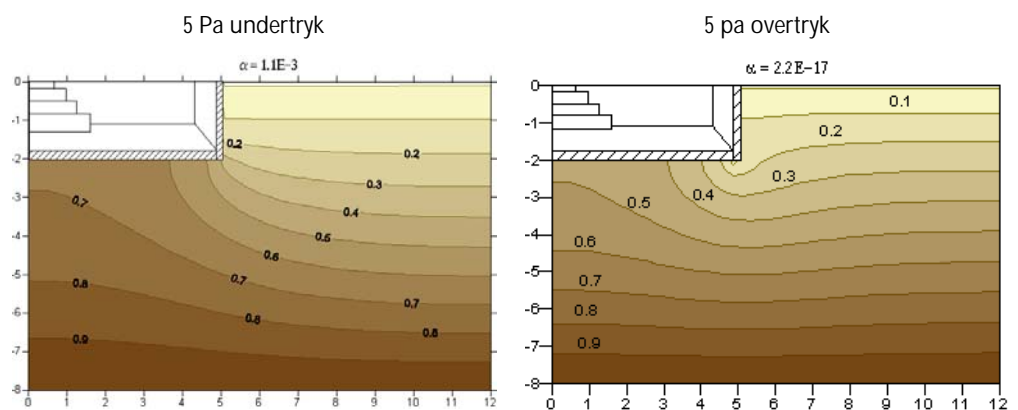


Figur 5.20 Steady-state poreluftkoncentration og iltindhold for scenarier henholdsvis med kelder (til venstre) og uden kelder (til højre). Øverst: Poreluftkoncentration for VOC3 uden nedbrydning, Midt: Poreluftkoncentration for VOC3 med nedbrydning, Nederst: Iltkoncentration. Medium sand.

6 Diskussion og sammenfatning

6.1 Poreluftens spredningsmønster omkring bygninger med kælder

De gennemførte modelsimuleringer med homogen jord indikerer, at en bygning med kælder har indflydelse på, hvordan poreluftkoncentrationen vil variere rumligt i jorden. For at illustrere det typiske mønster, der observeres, er der på figur 6.1 gengivet den stationære poreluftkoncentration under et hus med hhv. undertryk (5 Pa) og overtryk (5 Pa). I kælderen findes en sprække i samlingen mellem gulv og væg langs hele kælderen periferi.



Figur 6.1 Normaliserede steady-state poreluftkoncentrationer simuleret med varierende indendørstryk på henholdsvis 5 Pa undertryk og 5 Pa overtryk. Medium sand og sprække.

I nogen afstand fra huset ($> 3-4$ m) er den vertikale koncentrationsvariation tydeligt stort set upåvirket af forholdene omkring selve bygningen. Under selve huset ses i en given dybde en generel tendens til højere koncentrationer end væk fra huset. Dette skyldes, at huset forhindrer den fri opadrettede diffusion.

Betydningen af sprækken i fundamentet er mest tydelig for situationen med overtryk i bygningen, hvor luft fra kælderen strømmer igennem sprækken og ned i jorden under sprækken. De beregnede værdier af den samlede strømning ind/ud igennem sprækken ligger i intervallet 0,2-20 l/min. og afhænger primært af jordens permeabilitet, sprækkens samlede åbningsareal og trykforskellen henover sprækken. Derved kan den advective gastransport blive den dominerende proces i umiddelbar nærhed af sprækken, mens det i resten af den umættede zone væsentligst er diffusiv transport, der dominerer.

6.2 Betydningen af barometervariation

Der er gennemregnet i alt 20 scenarier, hvor der er inkluderet en tidlig variation i barometertrykket. For at få et samlet overblik over den tidlige variation i poreluftkoncentrationen, er den absolutte variation (β) beregnet i beregningspunkter (MP1-MP4) og sammenstillet i tabel 6.1. Den tilsvarende

variation i koncentrationen i bygningen er også medtaget med henblik på sammenligning.

Tabel 6.1 Beregnede værdier af den absolutte variation (β) for poreluftkoncentrationen i beregningspunkterne MP1-MP4 og i bygningen for samtlige scenarier udført med transient barometertryk. (Blanke felter indikerer, at data ikke er beregnet).

Nr.	MP1 [%]	MP2 [%]	MP3 [%]	MP4 [%]	I bygning [%]
1.1	0,1	15,2	0,5	0,6	89,6
1.2	0,1	27,0	0,9	0,9	91,6
1.3	0,2	7,6	0,3	0,3	89,1
1.4		11,3	0,2		24,9
1.5	3,2	5,4			
1.6	1,6	2,3			
1.7	3,1	1,6			
1.8	6,0	4,0			
1.9	3,7	2,4			
1.10	2,1		0,4		
1.11	1,2		0,2		
1.12	1,5		0,3		
2.1	0,1	3,4	0,9	0,9	73,4
2.2	0,0	13,0	0,5	0,5	88,6
3.1	25,0	25,6	0,8	0,9	90,8
3.2	12,7	13,9	0,5	0,5	90,8
4.1	0,2	82,5	0,0	0,2	87,5
4.2	0,1	26,8	1,0	1,0	90,3
4.3	0,5	70,5	0,0	0,2	88,9
4.4					89,1

Den naturlige variation i poreluftkoncentrationerne i scenarier med meget varierende barometertryk (amplitude og periode) og uden bygning er belyst ved scenarierne 1.5-1.12. Beregningspunkterne for den mest ekstreme variation (scenarie 1.8, 50 mbar og 20 dage) resulterer i en absolut variation på under 6%, svarende til en faktor (δ) på 1,128. For scenarierne med bygninger har det pga. modeltekniske årsager været nødvendigt at anvende en mindre variation i alle simuleringer (amplitude 3 mbar, periode 0,5 d).

Beregningspunktet MP4 er i alle scenarier med bygninger placeret i 5 m's afstand og i en dybde på 1,5 m u.t. I denne afstand er der ikke nogen påvirkning fra selve bygningen (jf. afsnit 6.1). Den absolutte variation i MP4 er mellem 0,2 og 1% og indikerer, at variationen i poreluftkoncentrationen som følge af ændringer i barometervariation i nogen afstand fra bygningen kan forventes at være under 1%. En absolut variation på 1% modsvarer en faktor (δ) på 1,02. For beregningspunktet MP1, der i alle scenarier med bygning er beliggende lige under midten af bygningen og væk fra sprækkerne langs fundamentet, ses der generelt en variation på under 0,5%.

Beregningspunktet MP2 (og MP1 i scenarie 3.1 og 3.2) er karakteriseret ved en placering i jorden direkte under den sprække, som findes i kældergulvet. Den umiddelbare nærhed til sprækken betyder, at poreluftens koncentration er delvist styret af den advective strømning af luft, der blev beskrevet i afsnit 6.1. Den tidslige variation i dette punkt udviser således også de største værdier af samtlige 4 beregningspunkter, med en variation på op til 82,5% for scenarie 4.1. Denne variation svarer til en værdi af faktoren (δ) på ca. 10.

I netop scenarie 4.1 findes et tyndt lavpermeabelt lag i den øverste meter. Dette lag virker som et "lag" på jorden og bevirker en øget advektiv transport igennem sprækken og dermed variation i poreluften omkring sprækken. Den

øgede advektive strømning ind i bygningen bevirker også et stigende koncentrationsniveau i selve bygningen. For MP2 ses dog også scenarier med en mindre variation på 3,4%, og det er således meget afhængigt af de konkrete parametre, hvor stor variation, der kan forventes, jf. afsnit 6.1.

Variationen i bygningens koncentration ved de forskellige scenarier varierer mellem 24,9% og 91,6%. Den laveste variation findes for scenarie 1.4, der også er det scenarie, der har den mindste variation i barometer-input (lav amplitude og kort periode). Den største variation ses i scenarie 1.2, der er karakteriseret ved at have den tykkeste umættede zone, højeste gaspermeabilitet i jorden og det mest neutrale tryk i bygningen i forhold til atmosfæretrykket. Den beregnede variation (β) på 91,6% svarer til en værdi af faktoren (δ) på ca. 23.

Generelt observeres følgende effekter af det varierende barometertryk på den tidslige variation af poreluftkoncentrationer under og omkring bygningen:

- Større amplitude og periode i barometer-signalet giver større variation
- Større gaspermeabilitet i jorden giver større variation
- Større tykkelse af den umættede zone giver større variation
- Større variation i jorden lige omkring bygningen ifht. ca. 3-4 m væk
- Signifikant størst variation i jorden lige omkring sprækken
- Lagdelinger i jorden - og dermed rumlige variationer i gaspermeabiliteten, kan give anledning til både større og mindre variation
- Ved stigende permanent undertryk i huset (ifht. barometertrykket) ses en mindre variation i jorden lige omkring sprækken

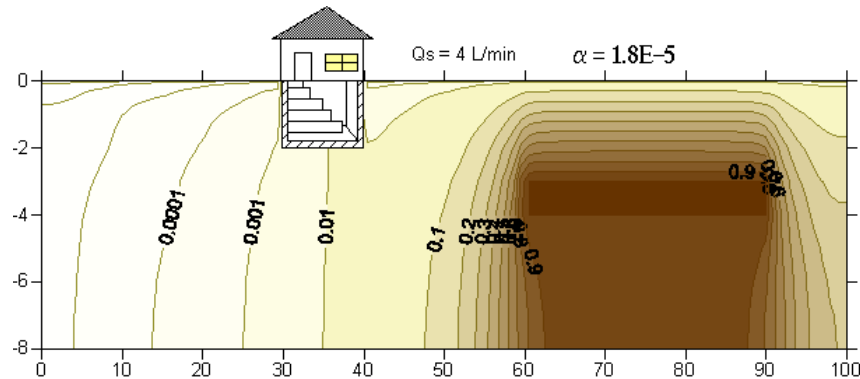
Tilsvarende observeres følgende effekter af det varierende barometertryk på den tidslige variation og størrelsen af koncentrationen i bygningen:

- Større amplitude og periode i barometer-signalet giver større variation
- Større gaspermeabilitet giver større gasflow igennem sprækken og dermed større variation og koncentration
- Større tykkelse af den umættede zone giver større variation og koncentration
- Lagdelinger i jorden - og dermed rumlige variationer i gaspermeabiliteten, kan give anledning til både større og mindre variation og koncentrationer
- Ved stigende permanent undertryk i huset (ifht. barometertrykket) ses mindre variation, men større koncentration
- Ved permanent overtryk i bygningen kan koncentrationen reduceres med mange størrelsesordener

6.3 Betydningen af kildens placering og tidslig variation i kildestyrken

En række simuleringer har haft til formål at belyse, hvilken indflydelse forskellige placeringer af kilden har på spredningsmønstret af poreluftforureningen. Til forskel fra de øvrige simuleringer med varierende barometertryk og en konstant kildekonzentration lige over grundvandet, er der her introduceret en kilde med konstant eller varierende koncentration, mens barometervariationen er udeladt.

Et repræsentativt eksempel på den stationære koncentrationsfordeling for en konstant kilde placeret i en vis afstand fra bygningen og midt i den umættede zone er vist på figur 6.2. Fra kildens overflade sker der diffusion i alle retninger, men størrelsen af koncentrationsgradienterne, der udvikles i de forskellige retninger, varierer. Under kilden er der stort set ingen gradient, idet koncentrationen over tid når næsten samme koncentration som i selve kilden. Mod terræn udvikles en ensartet gradient, der balancerer den stofmængde, der løbende afgasser til atmosfæren. I retning mod bygningen ses en tilsvarende gradient i afstande mindre end 10 m fra kilden. I større afstand fra kilden ses en mere ensartet gradient på ca. 1 størrelsesorden pr. 10 meter.

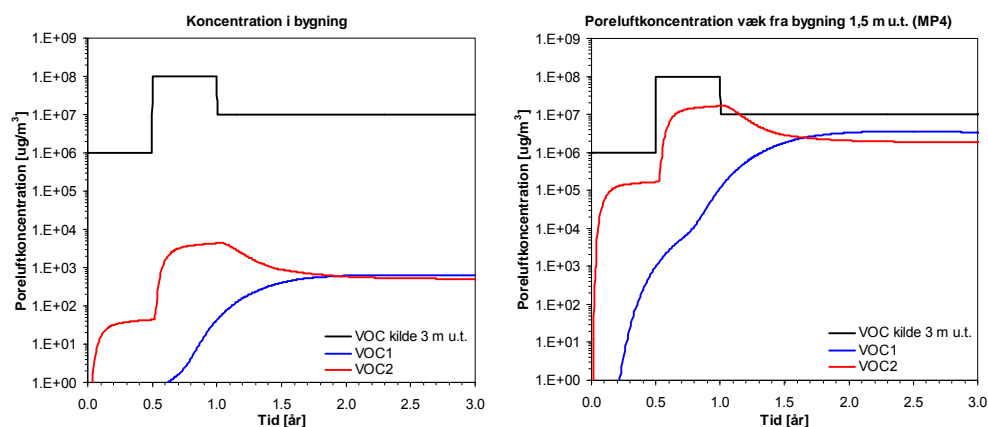


Figur 6.2. Tværsnitsprofil af poreluftkoncentration ved placering af VOC-kilde 20 m væk fra bygningen og i dybden 3-4 m.

Det bemærkes også, at der lige omkring huset findes en vis variation med ca. 10 gange højere koncentrationer på højre end på venstre side i 1 m's dybde. Under huset er koncentrationsfordelingen styret af den horisontale diffusion væk fra kilden og varierer med ca. en faktor 10 langs undersiden af fundamentet.

De beregnede størrelser af dæmpningskoefficienten (α) for de forskellige scenarier med varierende kildeplacering indikerer som forventet en aftagende dæmpningskoefficient med stigende afstand mellem kilde og bygning. Tilsvarende aftager dæmpningskoefficienten jo tættere på terrænet kilden placeres.

Effekten af en varierende kildestyrke fra en kilde placeret lige over grundvandet er undersøgt for 2 forskellige VOC'er med meget forskellige sorptionsegenskaber. På figur 6.3 er vist den tidslige variation i beregningspunkt MP4 placeret væk fra bygningen og den beregnede tidslige variation inde i bygningen for de to VOC'er.



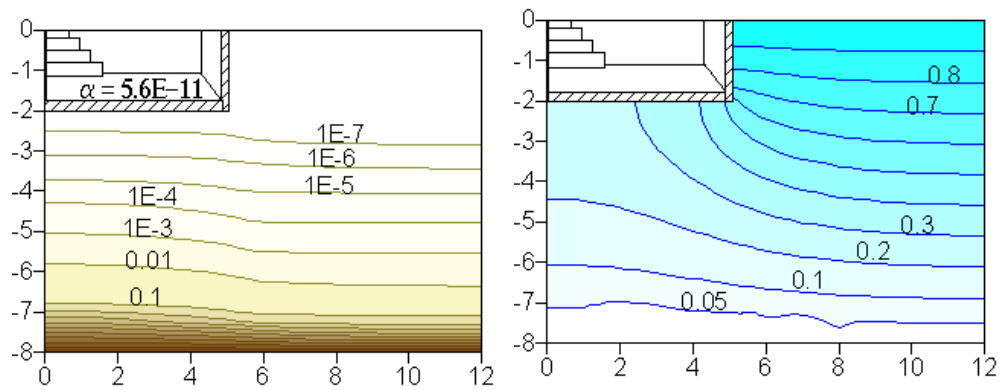
Figur 6.3 Udvikling i koncentration af VOC1 og VOC2 for transient kildestyrke for Medium sand med 8 m til GVS og for $f_{oc}=0,01$. (Til venstre): Koncentration i bygning, (til højre): Poreluftkoncentration væk fra bygning (MP4).

Beregningspunktet MP4 viser tydeligt, at sorptionen betyder en væsentlig forsinkelse af udbredelsen af VOC1, og at der først efter ca. 1,5 år ses en stationær koncentration. For VOC2 opnås steady-state i løbet af få måneder. En tidlig ændring i kildestyrken fx som følge af vandstandsændringer eller efter et pludseligt spild kan således være vanskelig at erkende for nogen typer VOC'er, og kan kræve målinger over lang tid. For koncentrationen i bygningen ses effekten af variationen i kildestyrken for VOC2 tydeligt, og efter en ændring i kildestyrken når der i løbet af få måneder at indstille sig steady-state forhold. For VOC1 ses steady-state forhold først efter 1,5 år, og således med en markant forsinkelse. Generelt observeres det, at stigende indhold af organisk stof i jorden og en stigende Koc-værdi for VOC'en vil medføre en reduktion i, hvor hurtigt den tidlige ændring i poreluften vil ske.

6.4 Betydningen af aerob nedbrydning

En række simuleringer har haft til formål at belyse, hvilken indflydelse en tænkt aerob nedbrydning har for poreluftforureningens udbredelse under varierende tykkelse af den umættede zone (dybde til kilden), kildens styrke og selve udformningen af konstruktionen (med/uden kælder).

Et eksempel på den stationære koncentrationsfordeling af både VOC3 og ilt er vist på figur 6.4. Ved den valgte kildestyrke og nedbrydningsrate vil diffusionen af ilt fra terræn og ned i den umættede zone være tilstrækkelig til overalt at begrænse den vertikale transport af VOC3 op igennem den umættede zone. Som følge af nedbrydningen dannes der således en markant vertikal koncentrationsgradient for VOC3 op igennem den umættede zone. Koncentrationen varierer således ca. 7 størrelsesordner, og dette medfører, at koncentrationen i bygningen bliver ca. 6 størrelsesordner lavere end situationen uden aerob nedbrydning.



Figur 6.4 Steady-state poreluftkoncentration af VOC3 (venstre) og iltindhold (højre) for scenarier med kilstyrke på 20 mg/l, $\lambda=0.18 \text{ t}^{-1}$, medium sand.

Betydningen af den aerobe nedbrydning er meget følsom over for den anvendte 1. ordens aerobe nedbrydningsrate, der samtidig er en parameter, der ofte kan være vanskelig at estimere for et givent stof. Simuleringerne indikerer samtidig, at hvis kilden findes fx kun 1 meter under kælderen, reduceres den forventede effekt af aerob nedbrydning signifikant, da der dels er en kortere transporttid (og dermed reaktionstid) og et mere begrænset tværsnitsareal, hvor ilt ved diffusion kan trænge ind under bygningen.

For en bygning uden kælder i forhold til én med kælder indikerer simuleringerne, at den væsentligste forskel skyldes, at ilt lettere kan diffundere ind under en bygning uden kælder, og derfor vil den aerobe nedbrydning alt andet lige kunne spille en større rolle.

7 Konklusion

7.1 Beregningsmodeller

Der er gennemført et litteraturstudie til kortlægning og beskrivelse af, hvilke analytiske og numeriske modeller til beregning af porelufttransport, der i dag finder anvendelse. Meget få modeller er i stand til at simulere specielt advektiv transport i gasfasen, og kun en enkelt model udviklet af Abreau og Johnson i USA /Abreau og Johnson, 2005/ giver mulighed for specifikt at inkludere en bygning med sprækker som en randbetingelse. Baseret på denne gennemgang, og ønskerne i følgegruppen, blev det besluttet at anvende Abreau og Johnson modellen. Samtlige simuleringer i denne rapport er således udført af hovedforfatteren til modellen, Lilian Abreau fra firmaet GeoSyntec i USA. Adgangen til koden, der ligger til grund for modellen, er ikke helt afklaret på nuværende tidspunkt, men EPA i USA har vist interesse for at udarbejde et brugerinterface og udgive modellen som freeware.

7.2 Barometerskabte variationer i poreluft- og indeklimakoncentrationer

Den barometer-inducerede tidlige variation i poreluftkoncentrationen og indeluften i en evt. bygning af en VOC er beregnet for i alt 20 scenarier, med kombinationer af parametre, der skal afdække de mest kritiske kombinationer.

I nogen dybde under en kælder ($>0,5$ m) og i nogen afstand fra en bygning (>1 m) er der fundet en tidlig variation i poreluftkoncentrationen omkring middelværdien (β) på mindre end 1%. Dette svarer til en faktor (δ) på mindre end 1,01 mellem den højeste og laveste koncentration. Selv for situationer uden bygninger, hvor der modelteknisk kunne anvendes en noget større variation i barometersignalet, sås kun en tilsvarende variation. I umiddelbar nærhed af en sprække i gulvet – uanset placering, er der fundet en tidlig variation i poreluftkoncentrationen omkring middelværdien (β) på mindre end 82,5%. Dette svarer til en faktor (δ) på mindre end 10 mellem den højeste og laveste koncentration.

Det konkluderes derfor, at de største variationer i jorden optræder i nærheden af sprækker, hvor den advektive luftstrømning er dominerende, mens der generelt ses mindre variationer i den umættede zone, hvor diffusion er den dominerende transportproces. Således konkluderes det, at variationen i poreluftkoncentrationen i den umættede zone generelt er under 82,5% omkring middelværdien – hvilket svarer til en faktor på mindre end 10 mellem den højeste og laveste koncentration.

For koncentrationen i bygningen er der fundet en tidlig variation i koncentrationen omkring middelværdien (β) på mindre end 91,6%. Dette svarer til en faktor (δ) på mindre end 23 mellem den højeste og laveste koncentration. Det konkluderes således, at variationen i koncentrationen i en bygning generelt er større end i jorden, og at denne variation er kontrolleret af bl.a. trykket i huset, luftskiftet i huset, sprækkens størrelse og jordens permeabilitet.

Sammenfattende konkluderes det derfor, at den tidlige variation i poreluftkoncentrationen i den umættede zone må forventes at være mindre end ca. 82,5% omkring middelværdien – hvilket svarer til en faktor på mindre end ca. 10 mellem den højeste og laveste koncentration. Dette er væsentlig mindre variation end hvad der blev konkluderet i bl.a. Poreluftprojektet /Miljøstyrelsen, 2006/, idet der her blev konkluderet at være en målbar variation på 2-4 størrelsesordner – svarende til en faktor 100 til 10000 gange.

7.3 Rumlig variation i poreluftkoncentrationen

Den rumlige variation i poreluftkoncentrationen i jorden – både med og uden bygninger, og med variationer i de enkelte parametre, er belyst ved samtlige 50 scenarier.

Det kan konkluderes, at en bygning med kælder vil påvirke både den horisontale og vertikale koncentrationsfordeling lige omkring og under huset – og i større grad end en bygning uden kælder.

Det konkluderes videre, at specielt kildeplaceringen i den umættede zone og lagdelinger (geologisk heterogenitet) samt aerob nedbrydning kan have en stor indflydelse på både den horisontale og vertikale koncentrationsfordeling lige omkring og under huset. Både den horisontale og vertikale variation kan således i nogle tilfælde variere en størrelsesorden over 10 cm, mens denne variation i andre situationer ses over en afstand over 10 m.

8 Referencer

Abreu, L.D.V og P.C. Johnson. Effect of vapour source-building separation and building construction on soil vapour intrusion as studied with a three-dimensional numerical model. *Environmental Science and Technology*, 39, 4550-4561, 2005.

Abreu, L.D.V og P.C. Johnson. Simulating the effect of aerobic biodegradation on soil vapour intrusion into buildings: Influence of degradation rate, source concentration, and depth. *Environmental Science and Technology*, 40, 2304-2315, 2006.

API. Simulating the effect of aerobic biodegradation on soil vapour intrusion into buildings: Evaluation of low strength sources associated with dissolved gasoline plumes. API Publication 4775, April 2009.

AVJ. Indeklimapåvirkning fra forurenede grunde. Amternes Videncenter for Jordforurening. Teknik og Administration, nr. 1, 2002.

Andersen, A., S. Nielsen, M.M. Broholm og N. Tuxen. Variationer i poreluftens forureningsindhold, Spor 2. Vurdering af usikkerheder. Miljøprojekt xxxx, Miljøstyrelsen, 2009.

Cowi. Poreluftstransport – teoretiske betragtninger, rev. 01. COWI, 11. feb. 2005.

EPA. Soil Screening Guidance: Technical Background Document. U.S. Environmental Protection Agency, 1996.

GSI RBCA Tool Kit for Chemical Releases Version 1.3, 2004. Groundwater Services, Inc. Houston, Texas, USA. http://www.gsi-net.com/Software/RBCA_tk_v2.asp

HYDRUS 1D. Version 4.0, 2008. PC Progress. http://www.pc-progress.cz/Fr_Hydrus.htm

HYDRUS 2D/3D. Version 1.05, 2008. PC Progress. http://www.pc-progress.cz/Fr_Hydrus.htm

Johnson, P.C. og R.A. Ettinger. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. *Environmental Science and Technology*, 25:1445-1452, 1991.

Jury, W.A., W.F. Spencer og W.J. Farmer. Behavior assessment model for trace organics in soil: I. Model description. *J. Environ. Qual.*, Vol. 12, nr. 4, pp. 558-564, 1983.

Lahvis, M. og A.L. Baehr. Documentation of R-UNSAT, A computer model for simulation of reactive, multispecies transport in the unsaturated zone. U.S. Geological Survey, 1997.

Miljøstyrelsen. Oprydning på forurenende lokaliteter – Appendikser. Vejledning fra Miljøstyrelsen, Nr. 7, 1998.

Miljøstyrelsen. Poreluftprojektet. Styrende parameter for tidlige variationer af indholdet af klorerede opløsningsmidler i sand- og lerjorde. Hovedrapport og bilagsrapport. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Miljøprojekt nr. 1094 og 1095, Miljøstyrelsen, 2006.

Modflow-Surfact Software (Version 3.0). Overview: Installation, registration, and running procedures. Hydrogeologic, Inc. VA, USA, 1996.

Nielsen, S. Stoftransport i umættet zone. Matematisk modellering af transport af TCE i den umættede zone. Eksamensprojekt ved Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.

Pruess, K. og A. Battistelli. TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Saturated-Unsaturated Heterogeneous Media. Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, April 2002.

Region Syddanmark. Udredningsprojekt for Region Syddanmark og Miljøstyrelsen. Udbud. Variationer i poreluftens forureningsindhold, Opstilling af modelscenarier, udvælgelse af modeller og modelkørsler, november 2007.

RISC Workbench Version 4.0. Waterloo Hydrogeologic, 2004.
<http://www.sciencesoftware.com/pages.php?pageid=11>

Shan C. og D. Stevens. An analytical solution for vertical transport of volatile chemicals in the vadose zone. Journal of Contaminant Hydrology, 18, pp. 259-277, 1995.

STOMP – Subsurface Transport over Multiple phases, 2003. Pacific Northwest National Laboratory's, USA. <http://stomp.pnl.gov/index.stm>

T2VOC/TMVOC, 2002.
<http://www-esd.lbl.gov/TOUGH2/T2VOC.html>

UTCHEM-9.0. Reservoir Engineering Research Program. Centre for Petroleum and Geosystems Engineering. The University of Texas at Austin, 2000.

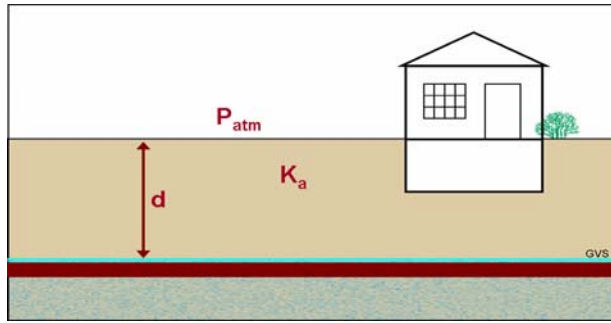
9 Symbolliste

Parameter	Symbol	Enhed
Diffusionskoefficient i luft	D_a	m^2/s
Diffusionskoefficient i vand	D_w	m^2/s
Henrys konstant	H	-
Sorptionskoefficient	K_{oc}	l/kg
1. ordens nedbrydningskoefficient	λ	d^{-1}
Total porøsitet	ϕ_T	-
Vandfyldt porøsitet	ϕ_w	-
Luft permeabilitet	K_a	M^2
Volumenvægt	ρ_b	kg/m^3
Indhold af organisk stof	f_{oc}	-
Vandspejlsniveau	D	m
Tryk amplitude	A	Mbar
Tryk periode	T	dage
Nedbør	q_w	m/s
Vind	V	m/s
Temperatur	T	$^{\circ}C$
Bygningens længde	L	m
Bygningens bredde	B	m
Bygningens dybde	D	m
Fundamenttykkelse	d_f	m
Sprækkelængde	l_s	m
Sprækkevidde	w_s	m
Luftudveksling	A_{ex}	t^{-1}
Relativt tryk i bygning	ΔP	Pa

Bilag

Bilag A

Scenarium 1.1 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

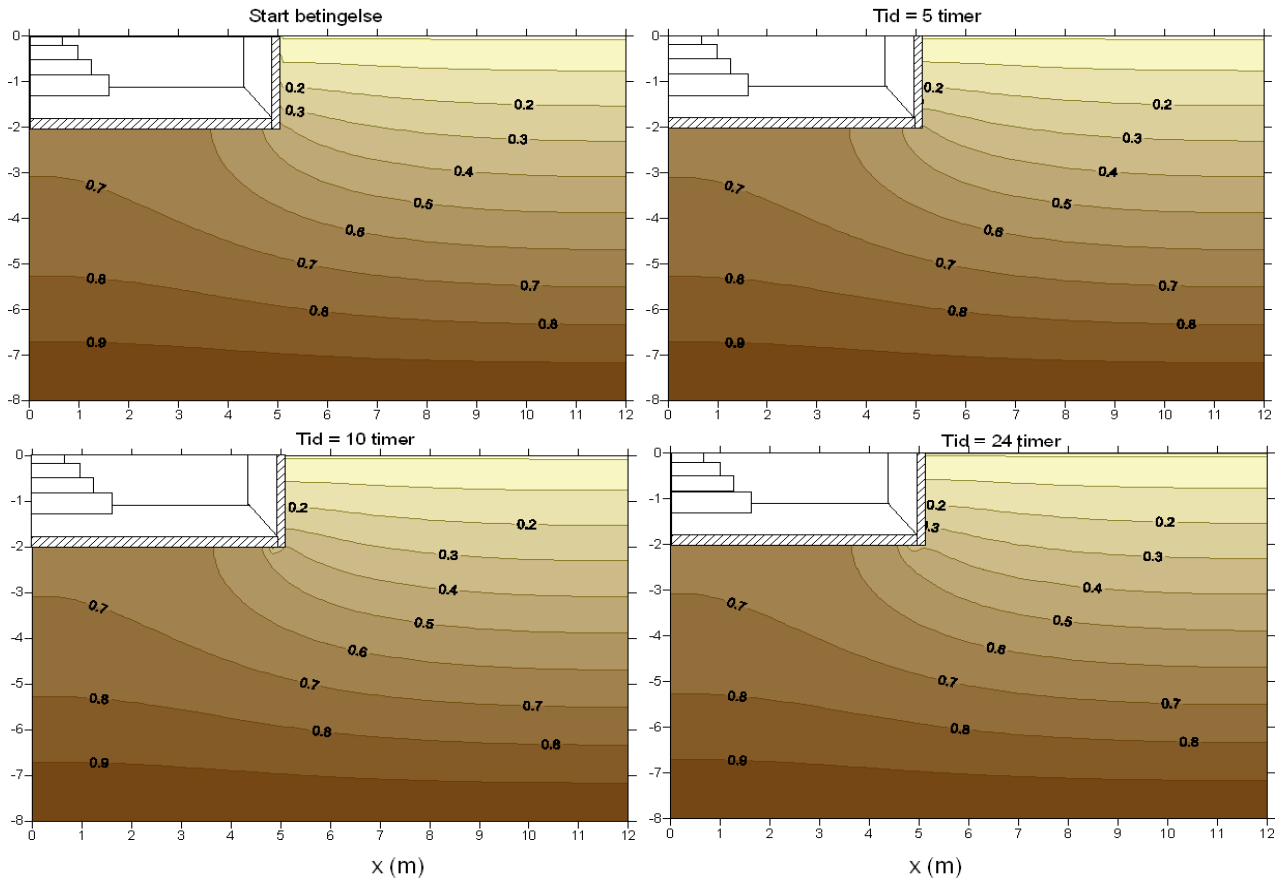
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

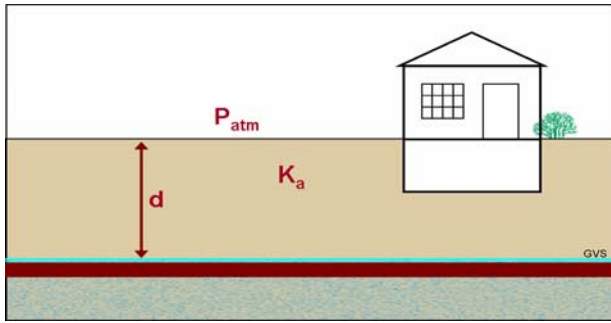
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.1 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

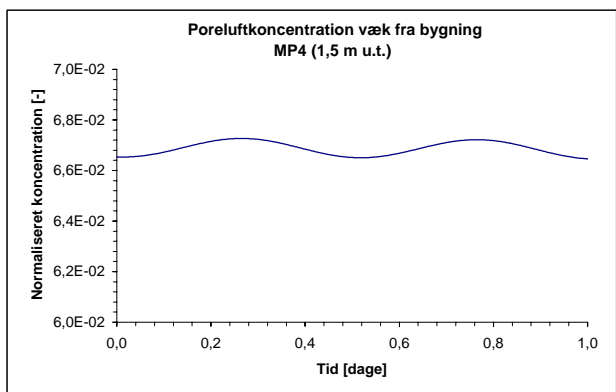
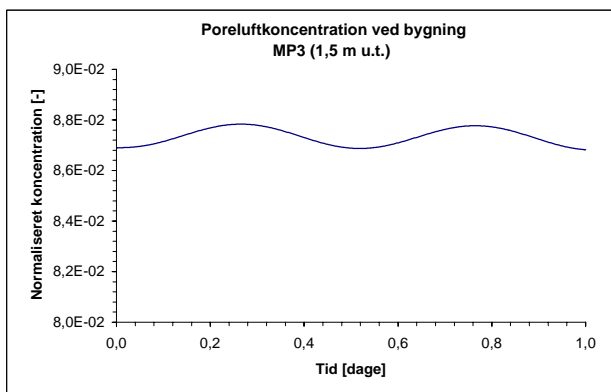
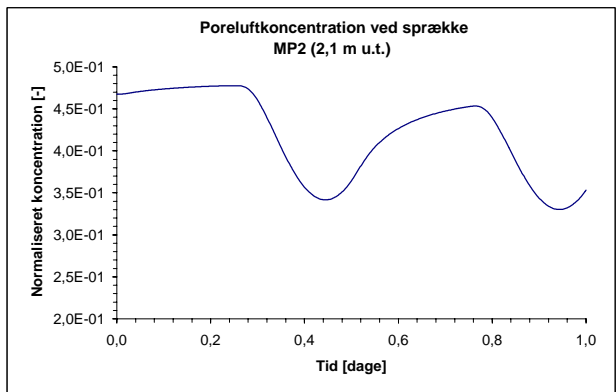
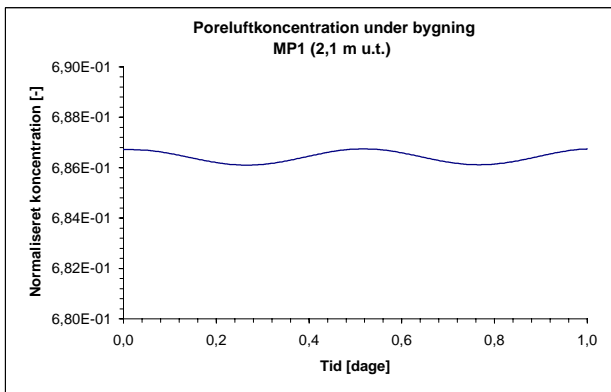
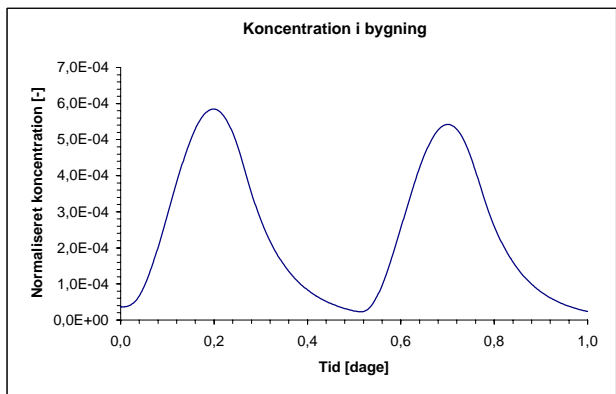
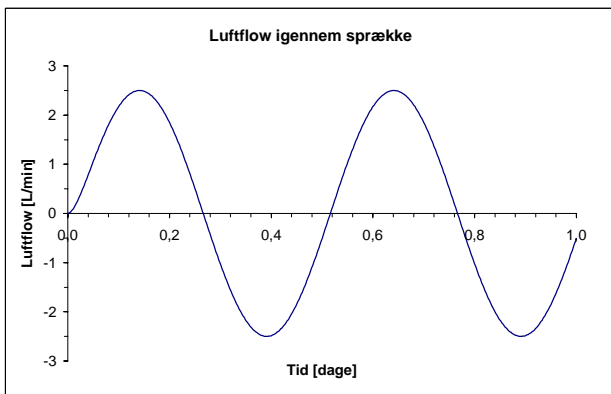
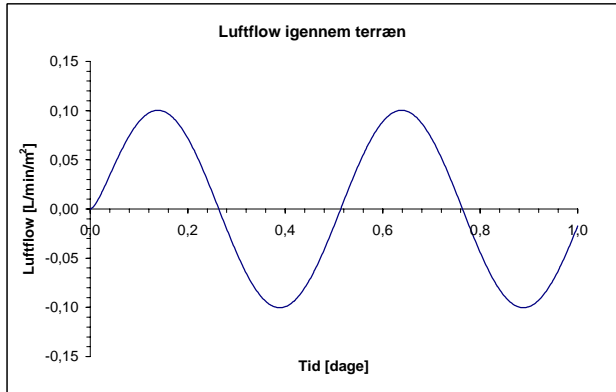
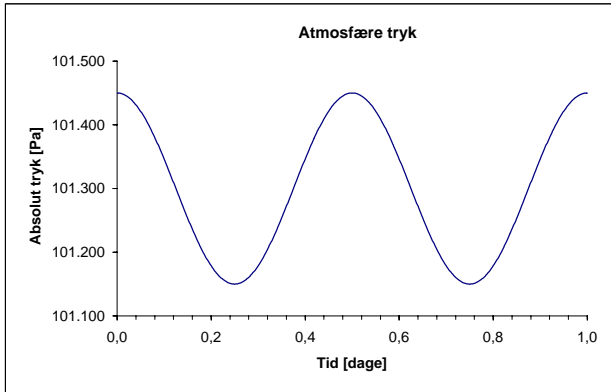
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

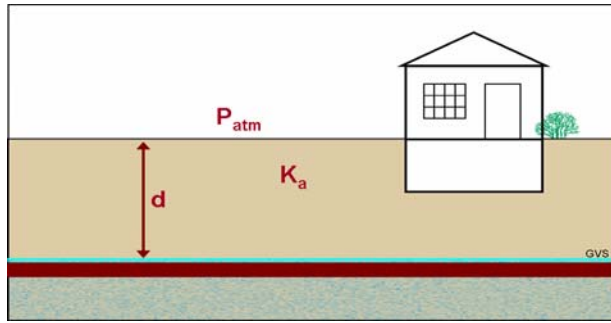
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.2 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

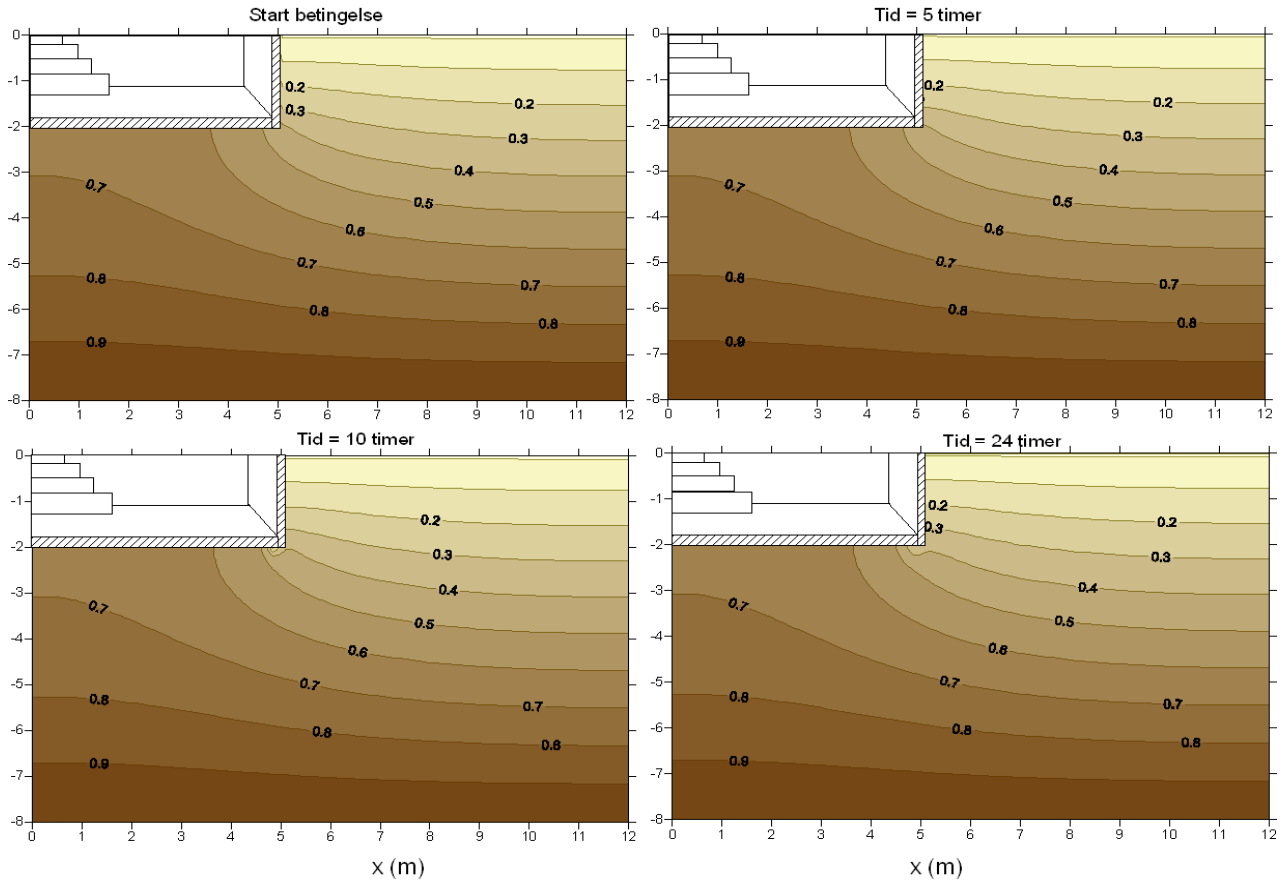
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

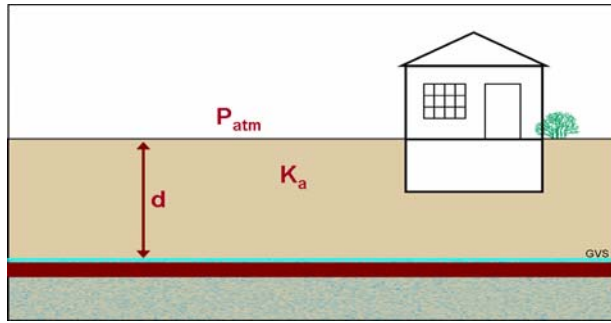
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.2 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

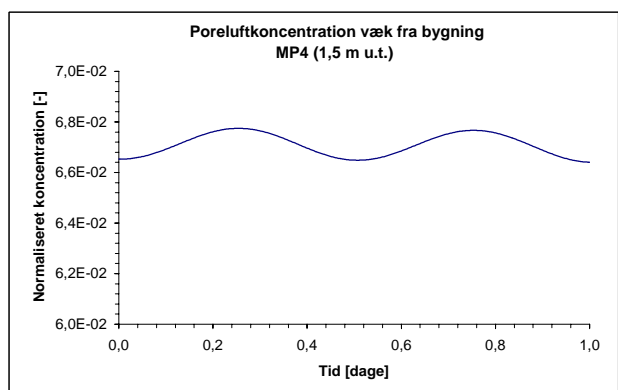
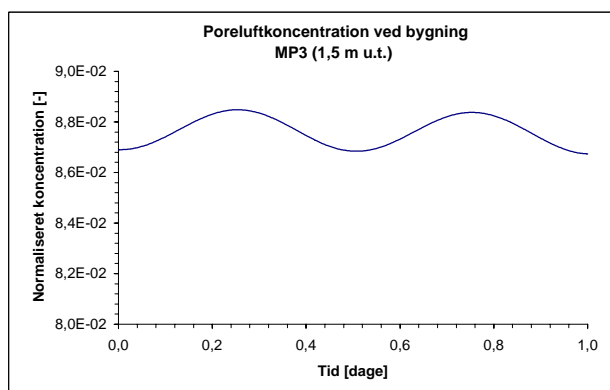
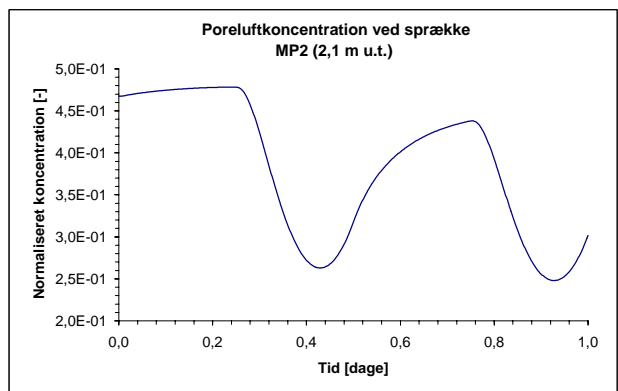
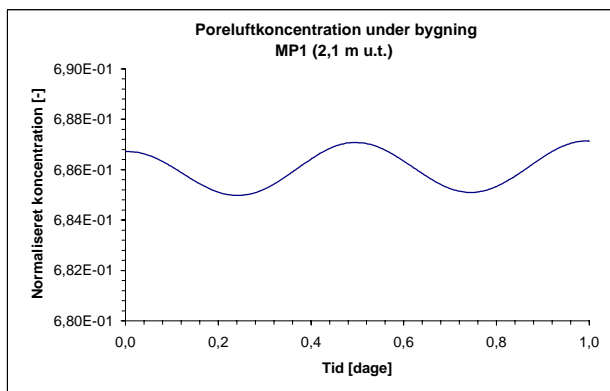
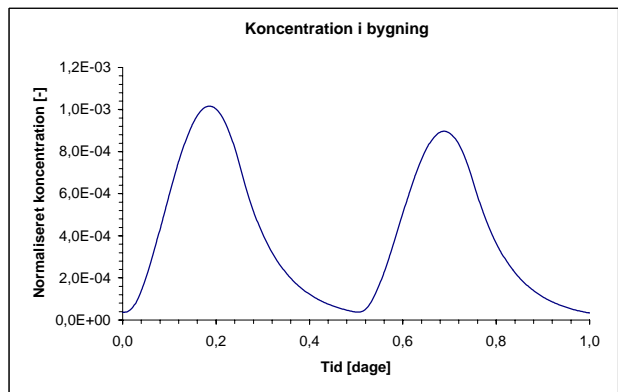
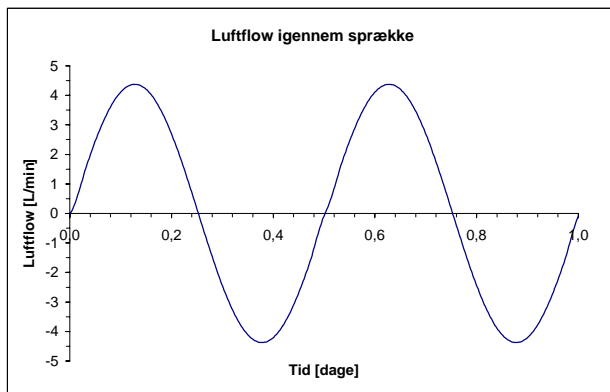
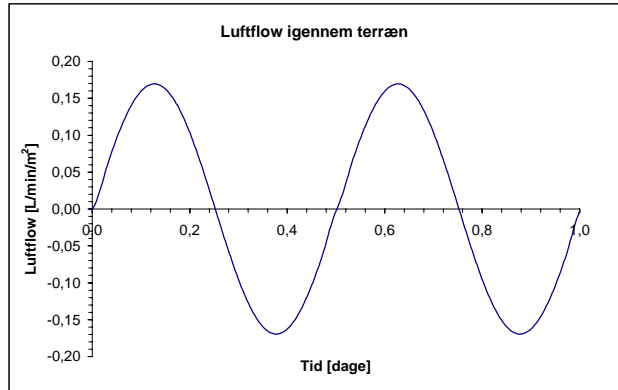
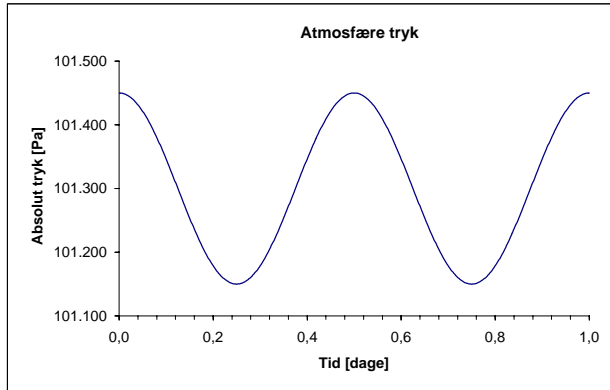
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

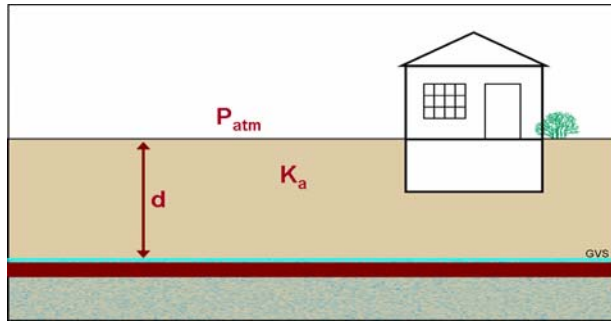
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.3 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

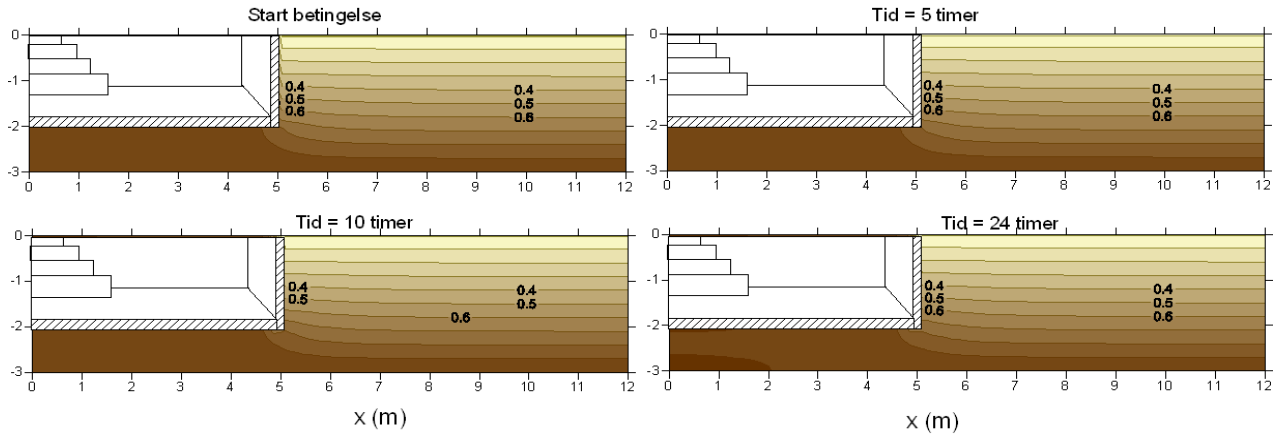
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

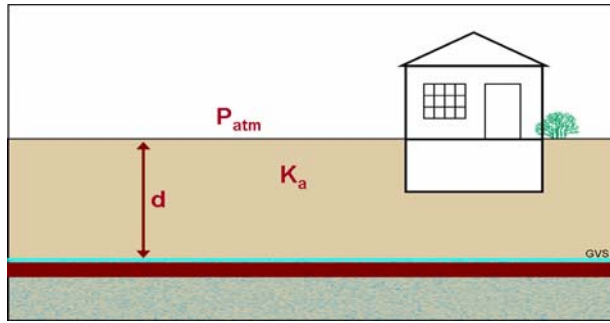
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.3 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

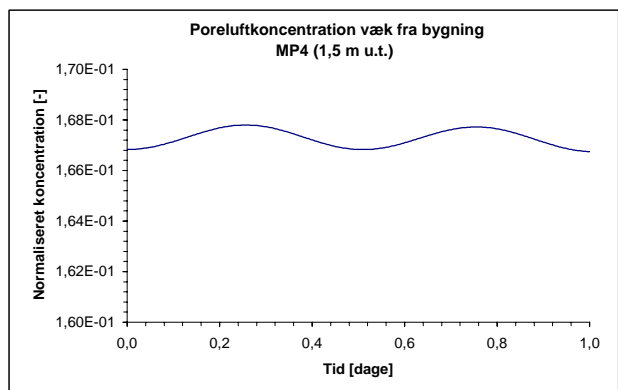
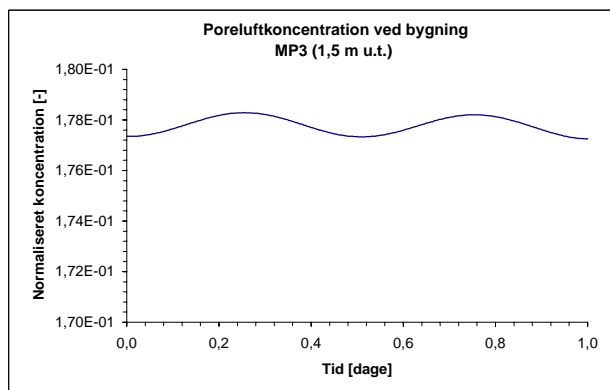
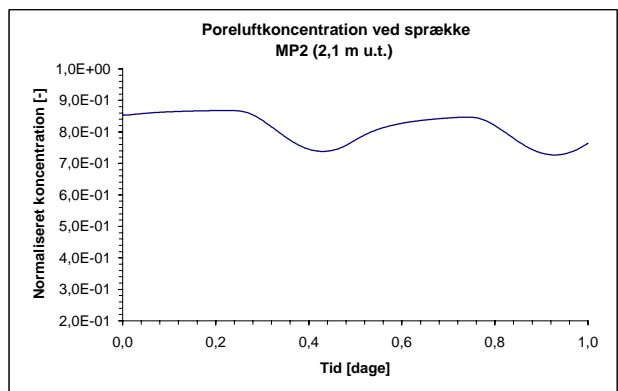
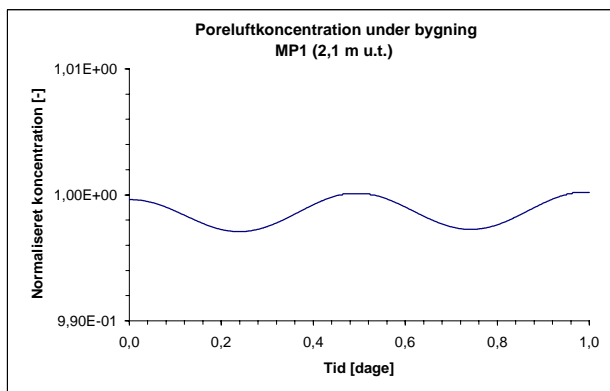
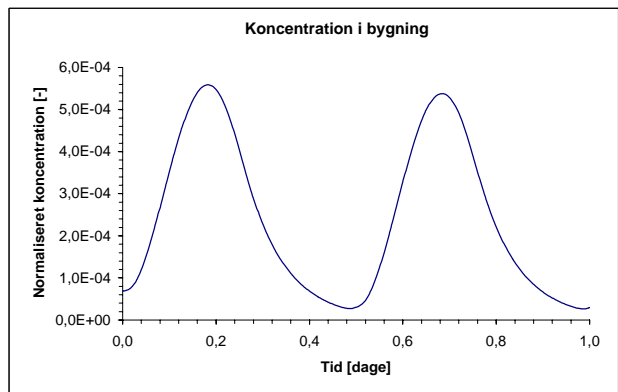
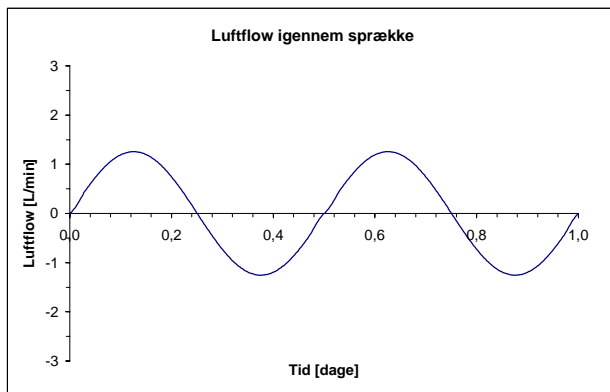
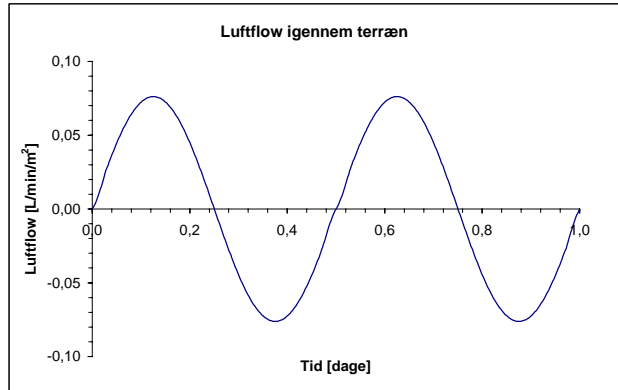
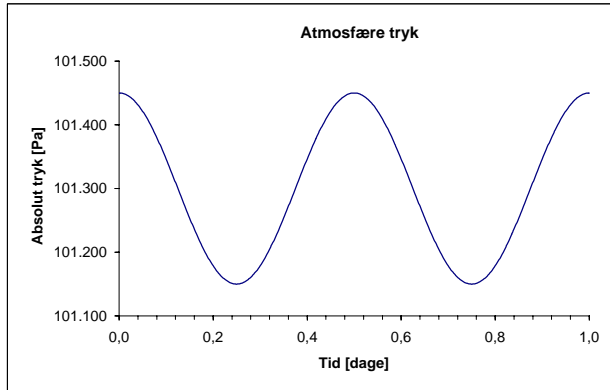
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

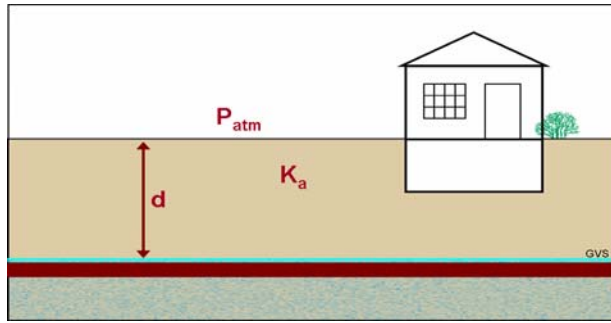
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.4 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

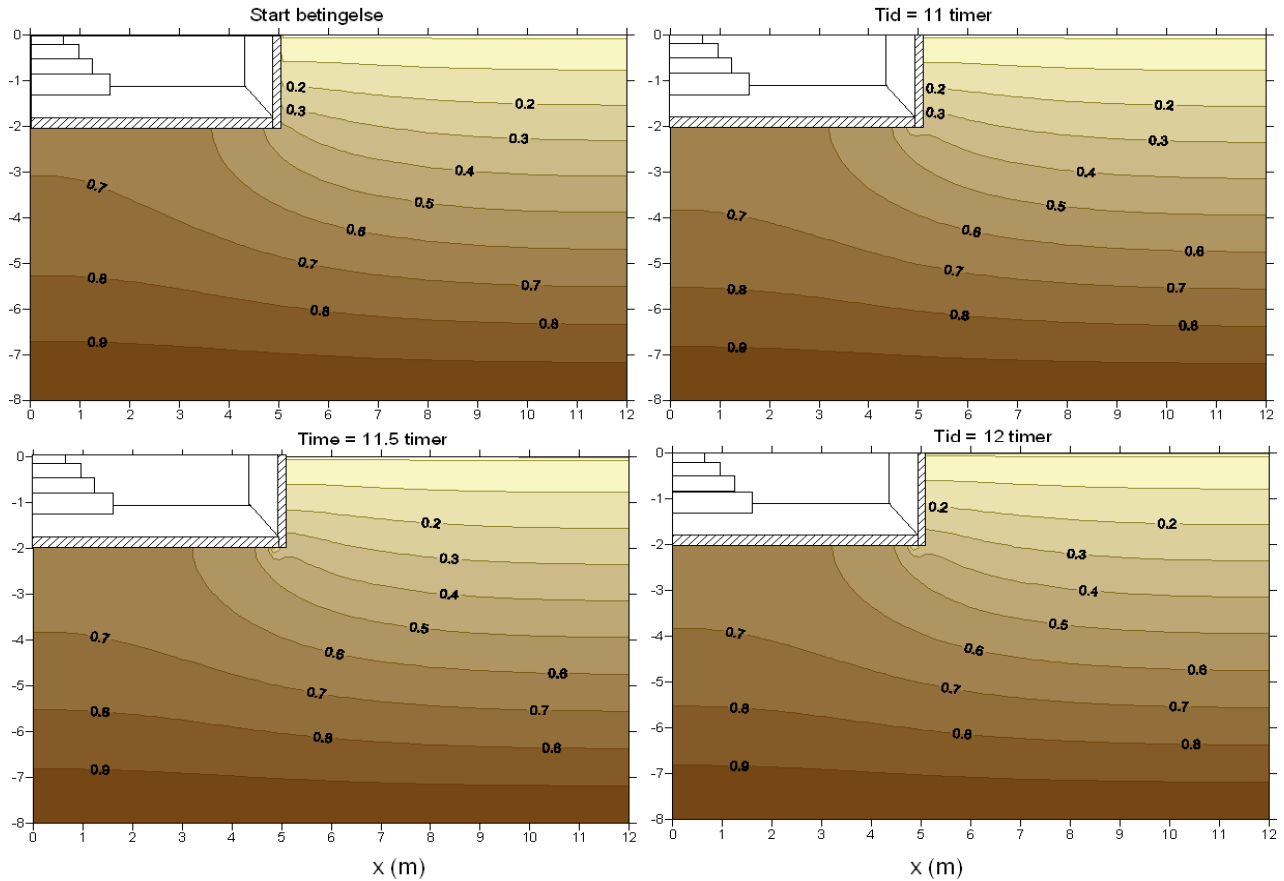
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

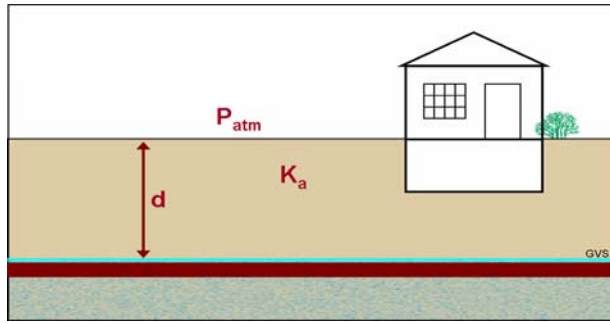
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 100 Pa, Periode = 2 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.4 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

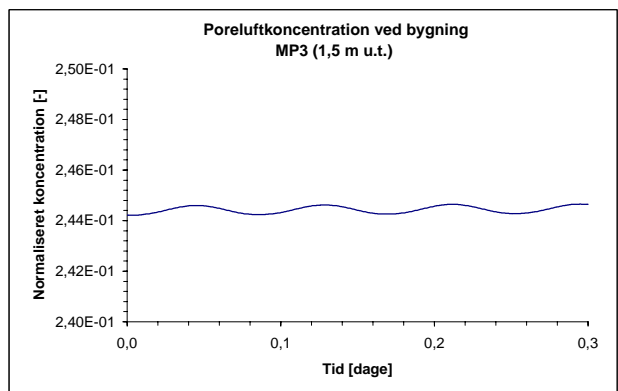
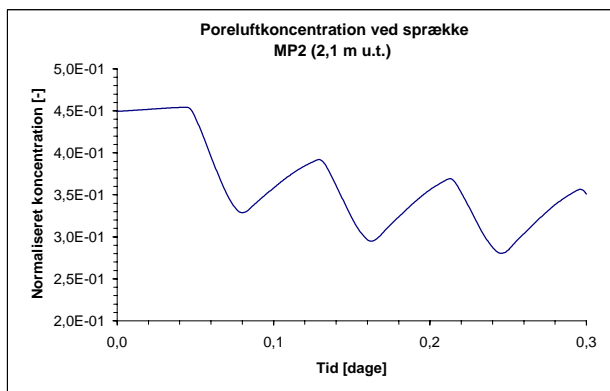
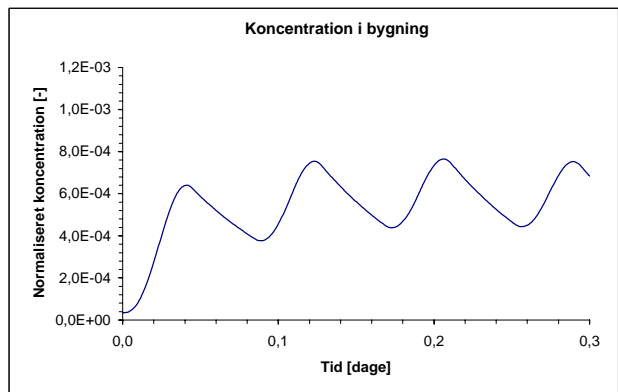
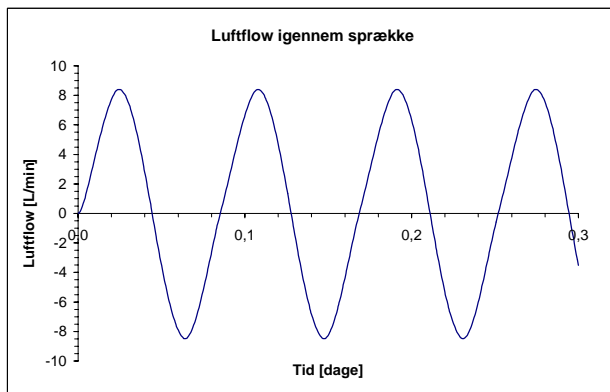
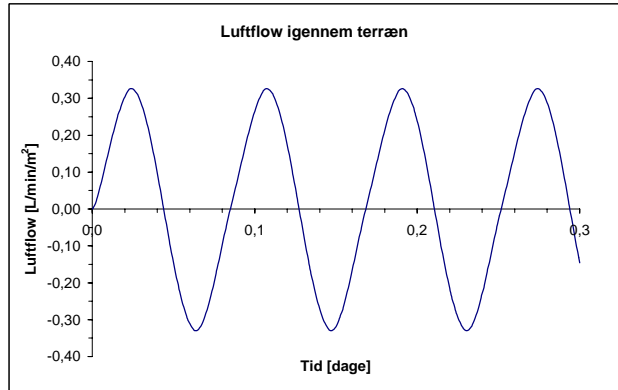
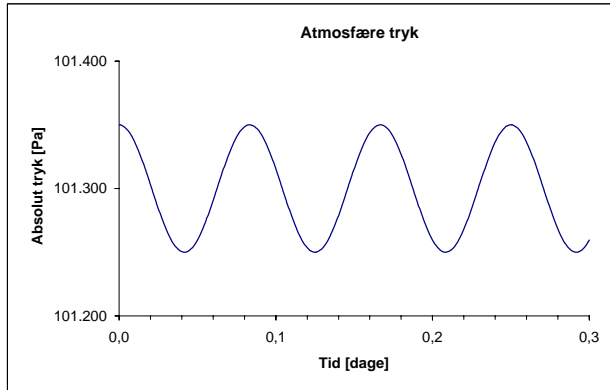
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

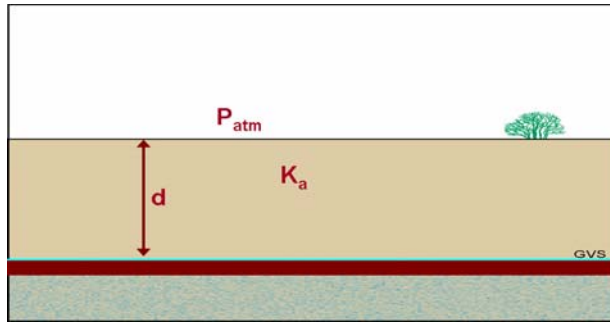
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 100 Pa, Periode = 2 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 1.5 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

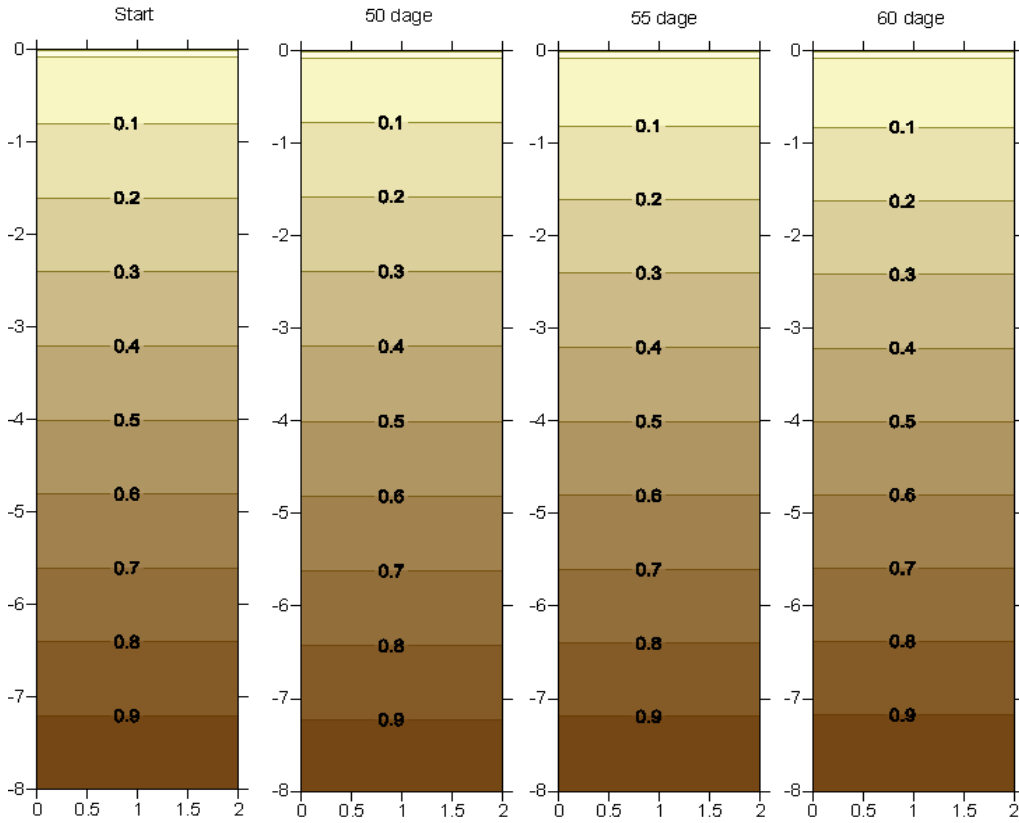
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

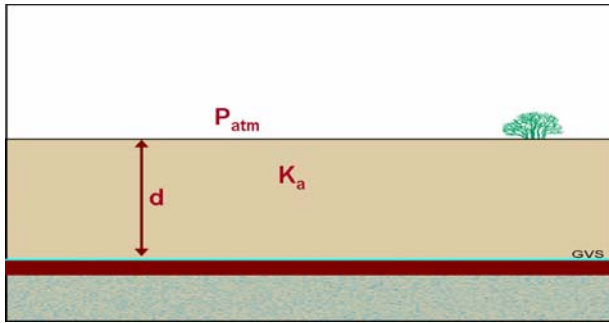
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 3000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Ingen bebyggelse



Scenarium 1.5 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

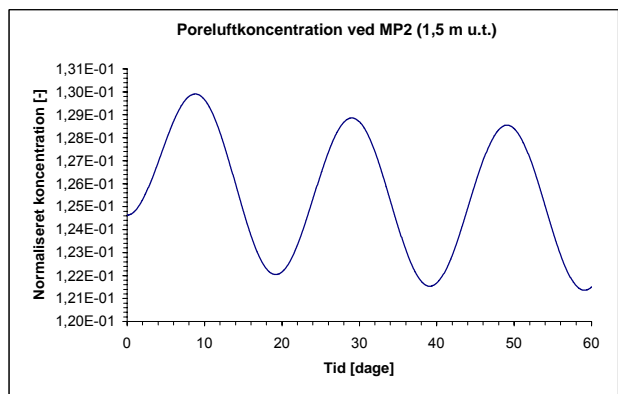
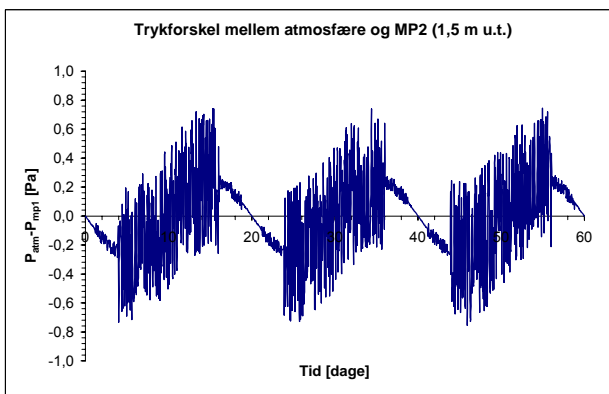
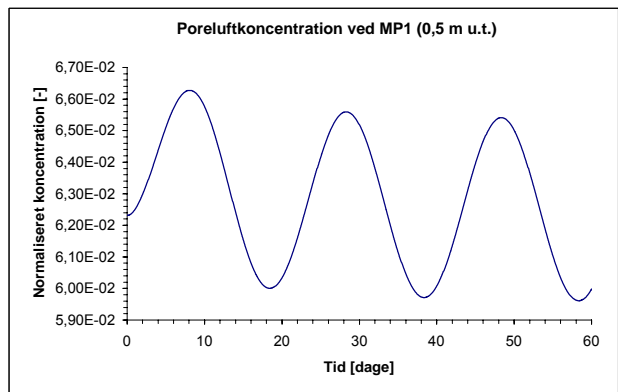
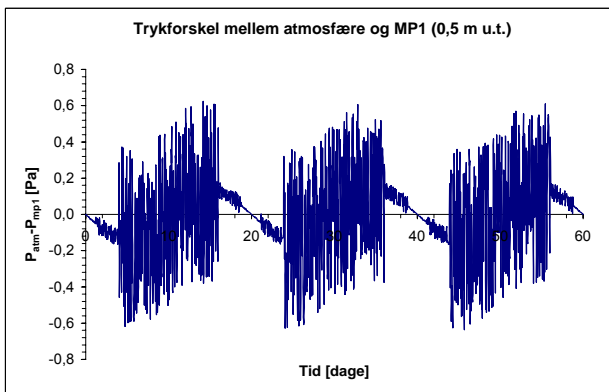
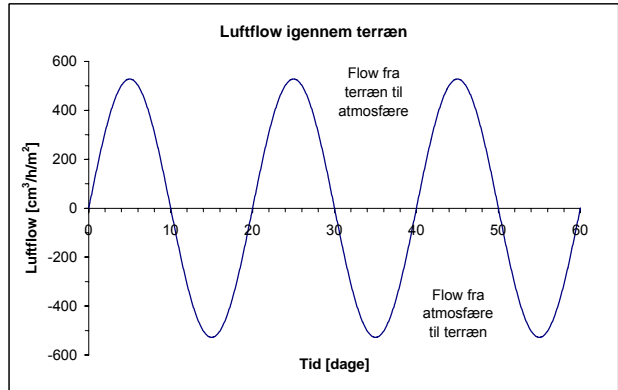
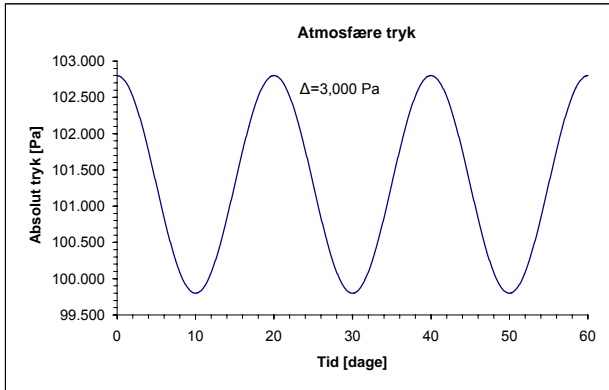
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

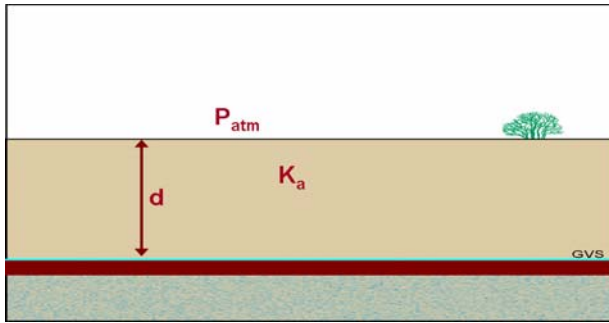
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 3000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Ingen bebyggelse



Scenarium 1.6 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

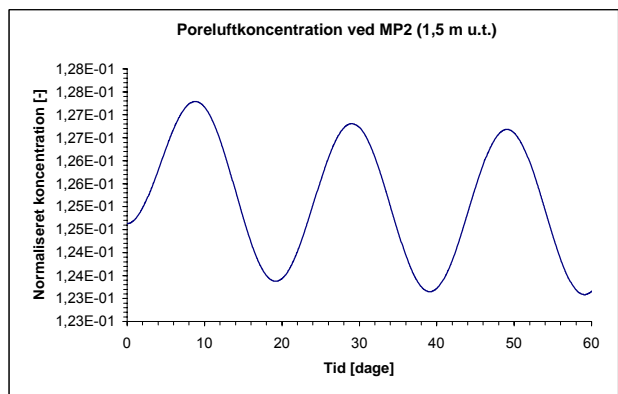
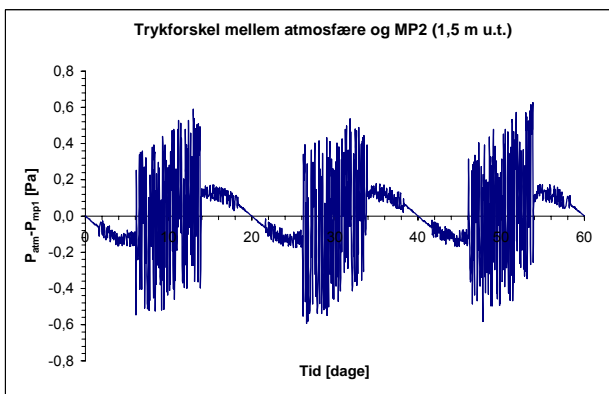
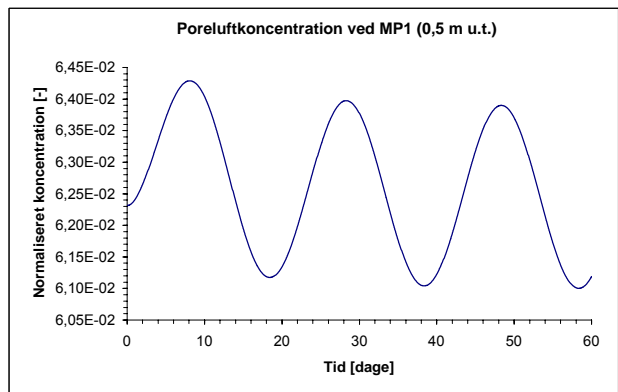
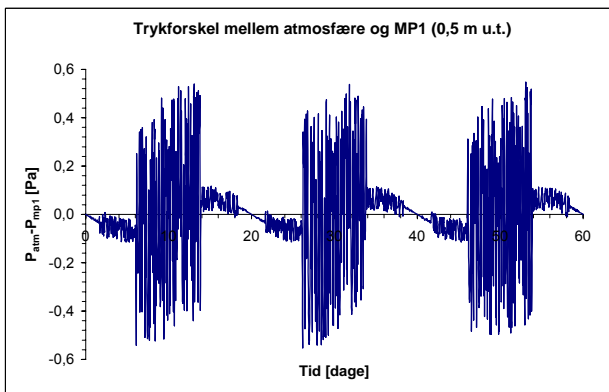
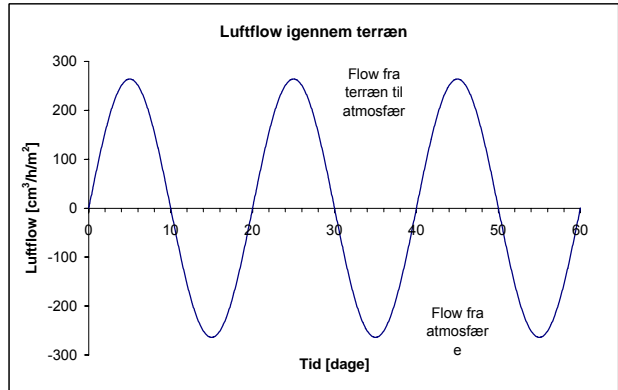
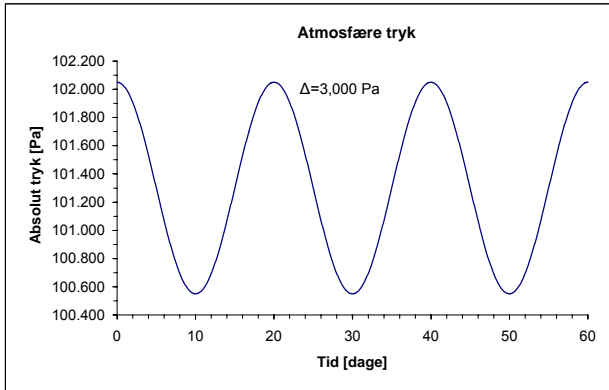
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

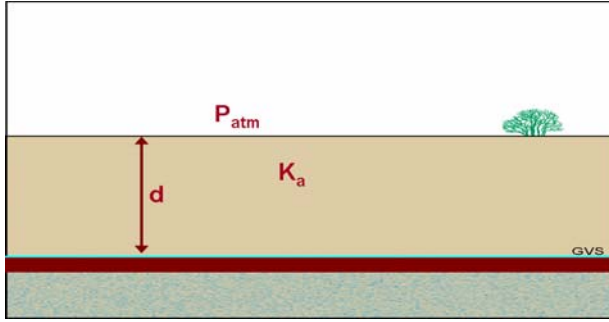
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 1500 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Ingen bebyggelse



Scenarium 1.7 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

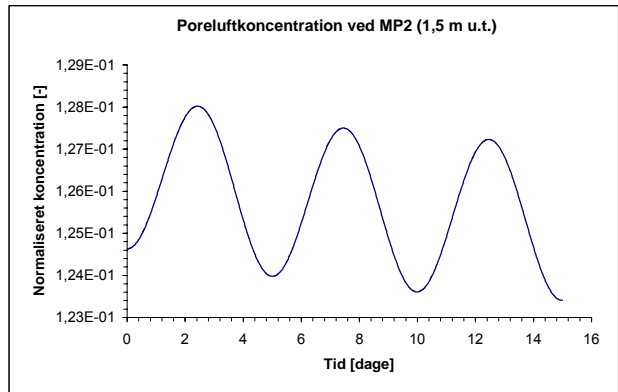
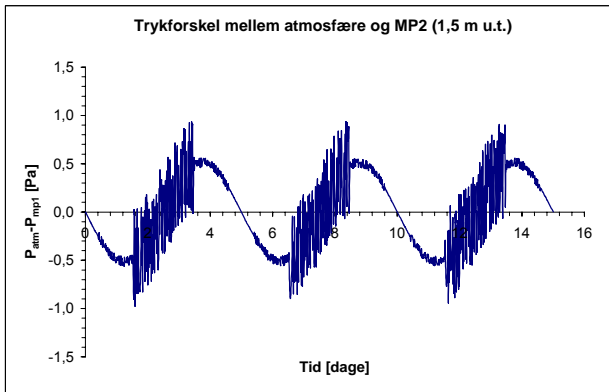
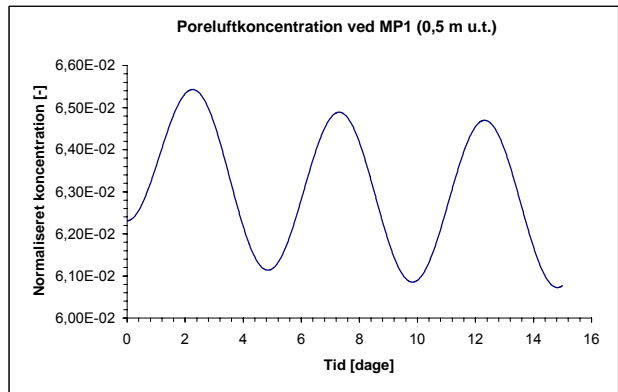
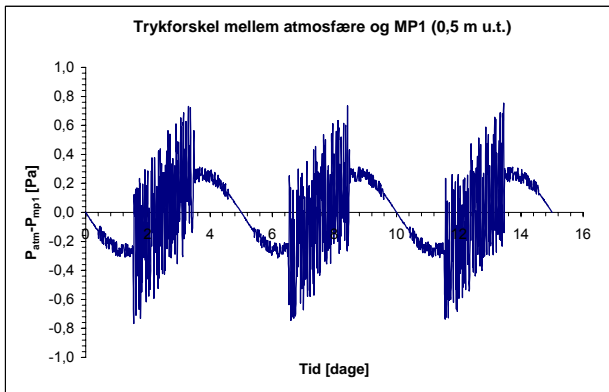
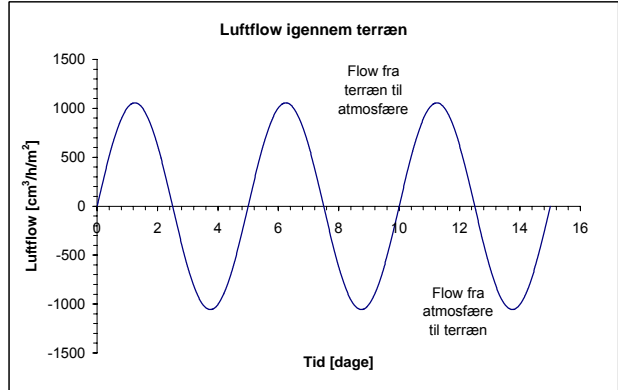
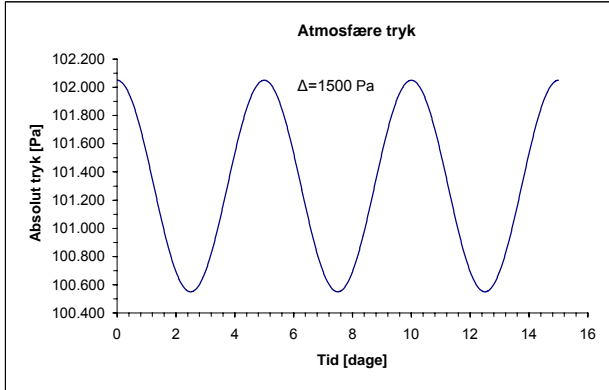
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

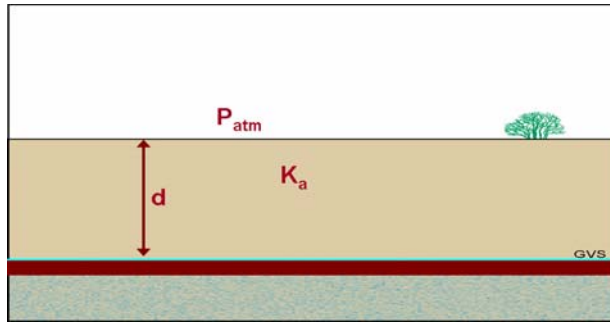
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 1500 Pa, Periode = 5 dage

Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Scenarium 1.8 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

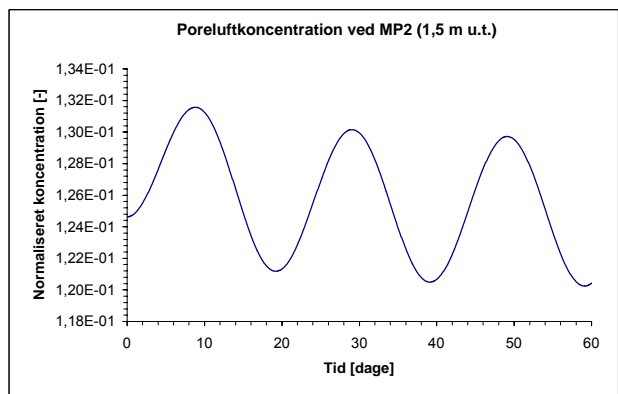
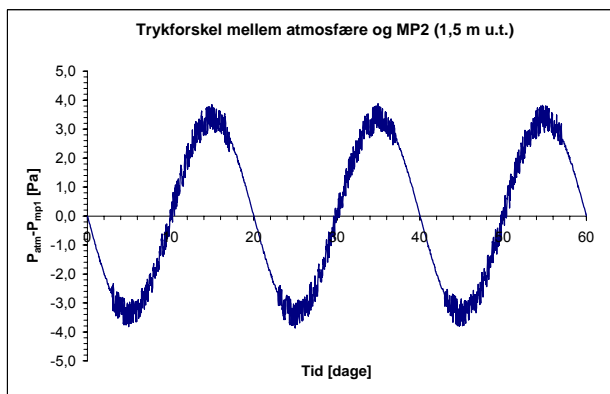
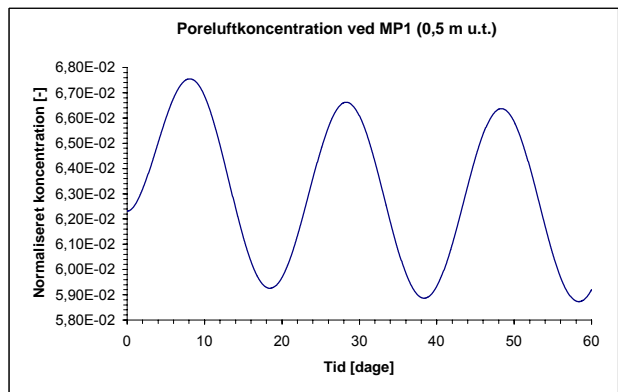
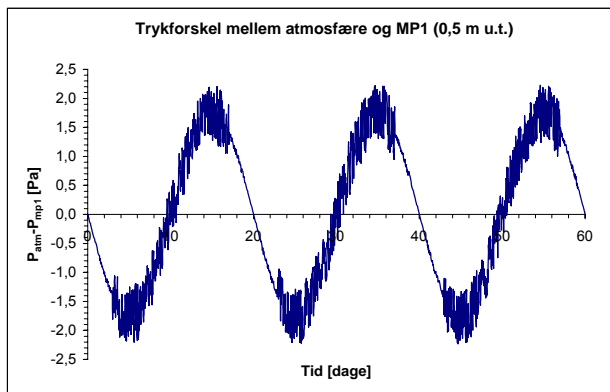
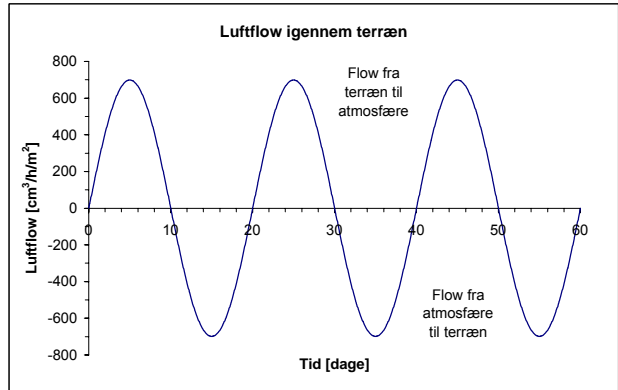
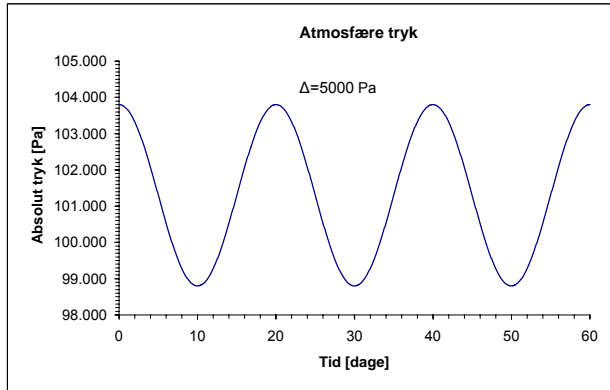
Homogen, fin sand
 $K_a = 1E-12 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

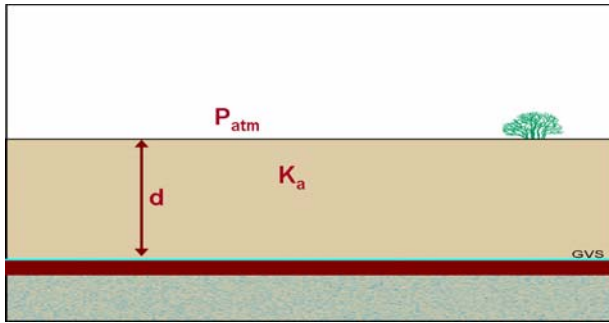
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 5000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Scenarium 1.9 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

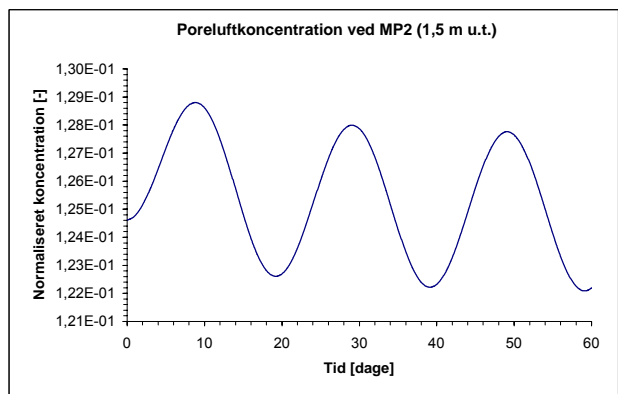
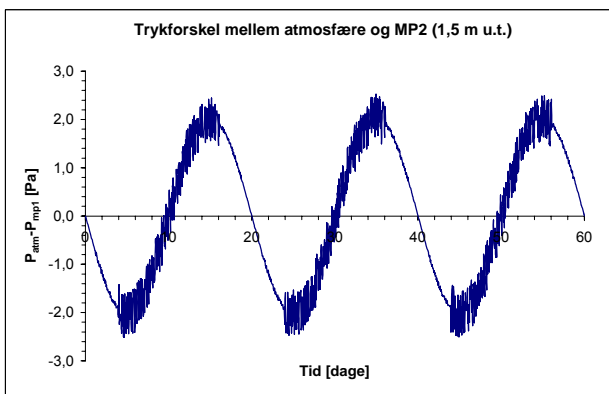
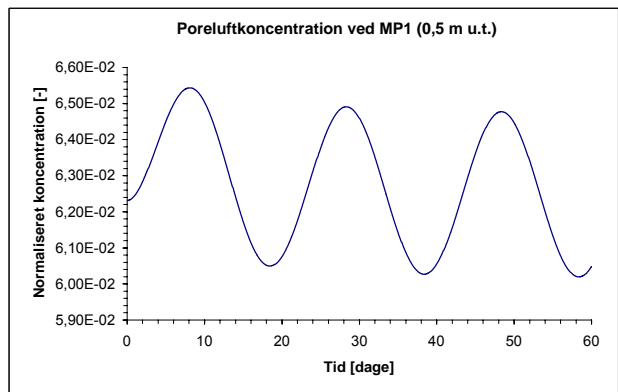
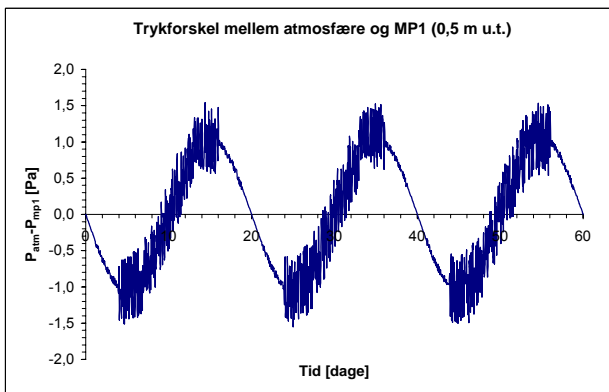
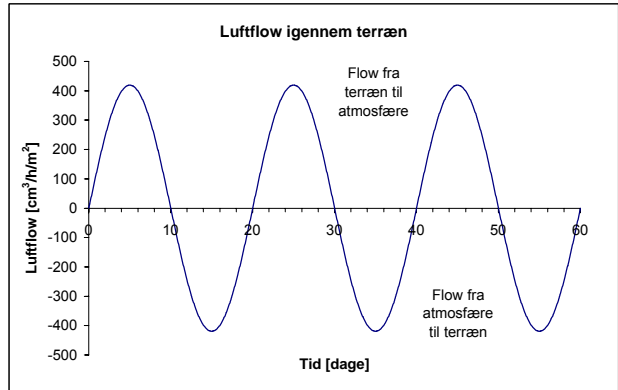
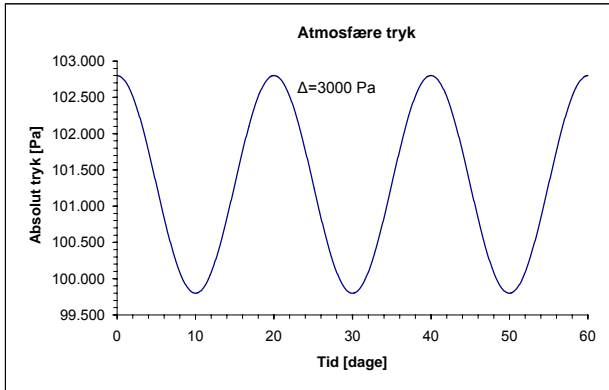
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

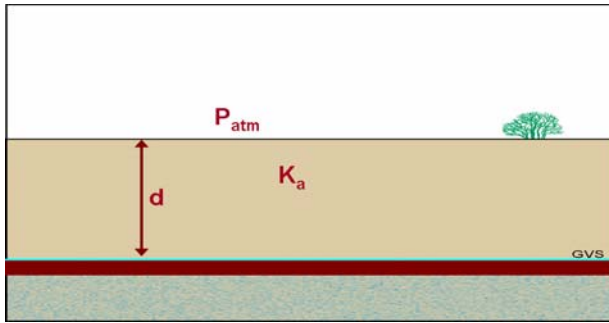
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 3000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Scenarium 1.10 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

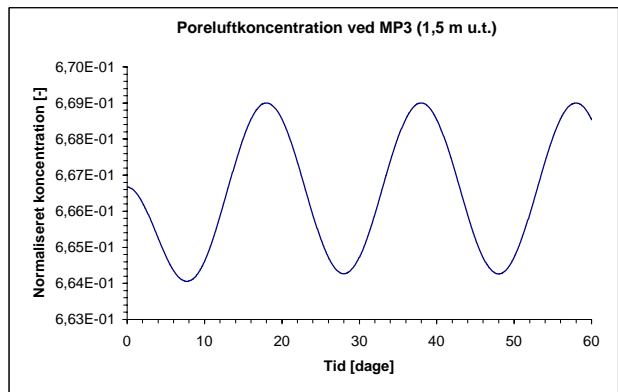
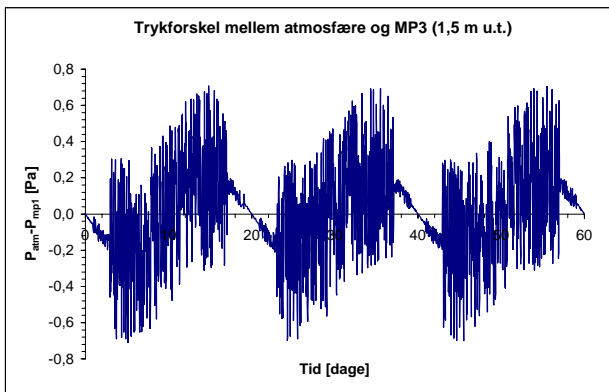
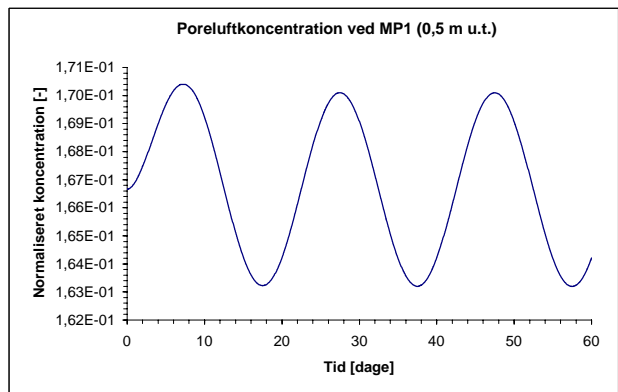
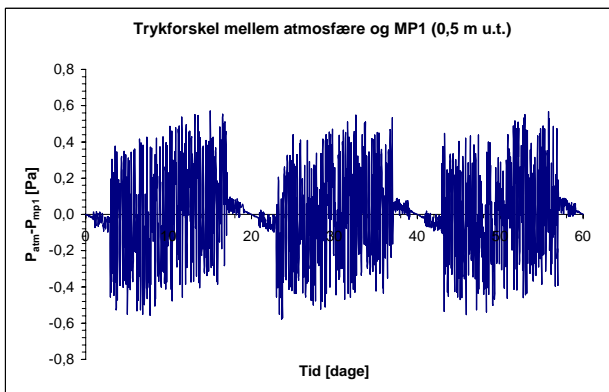
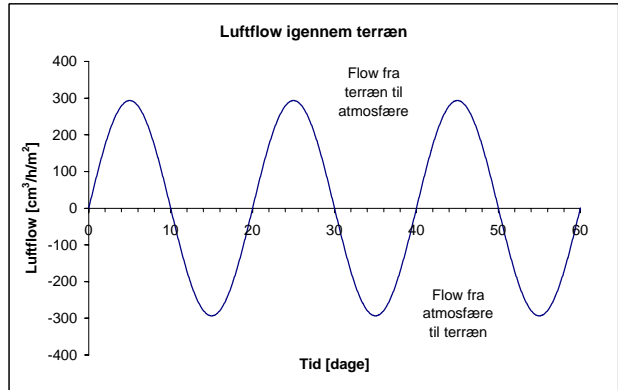
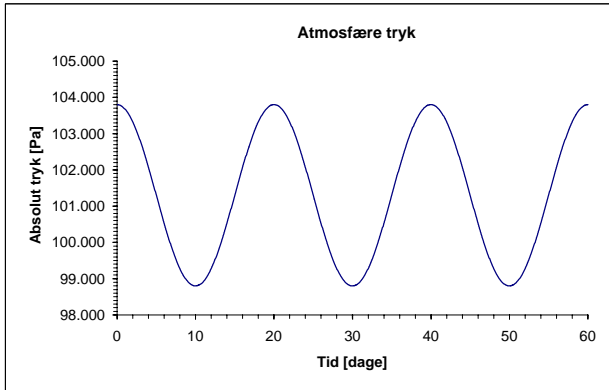
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

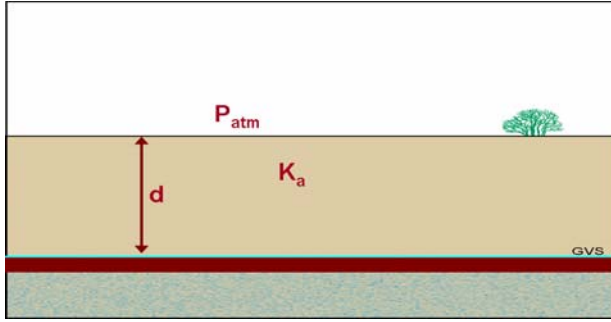
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 5000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Scenarium 1.11 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

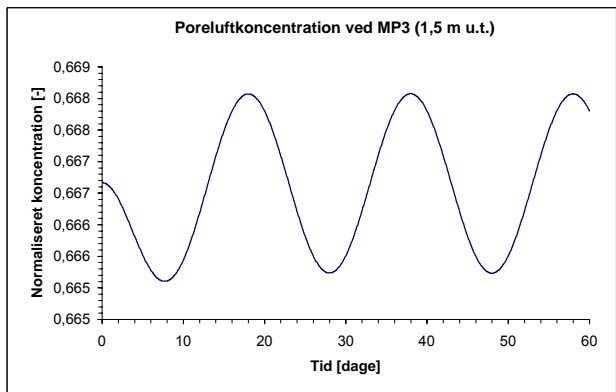
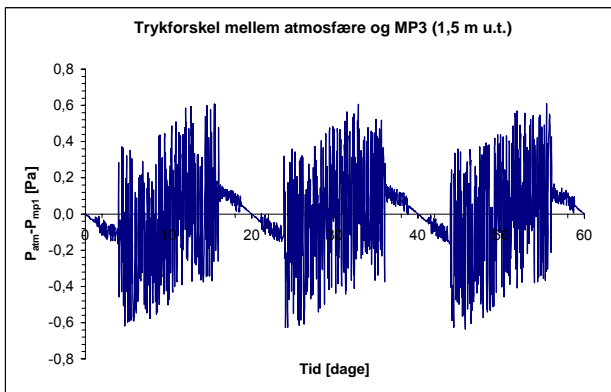
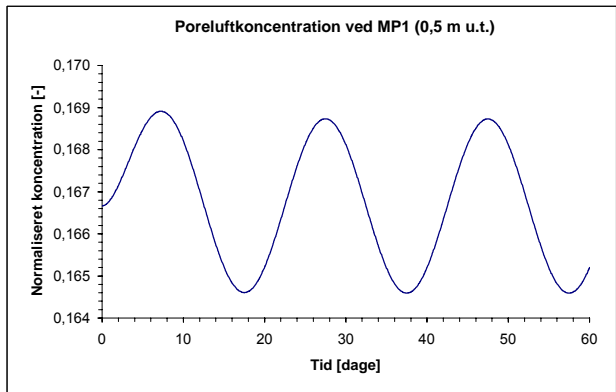
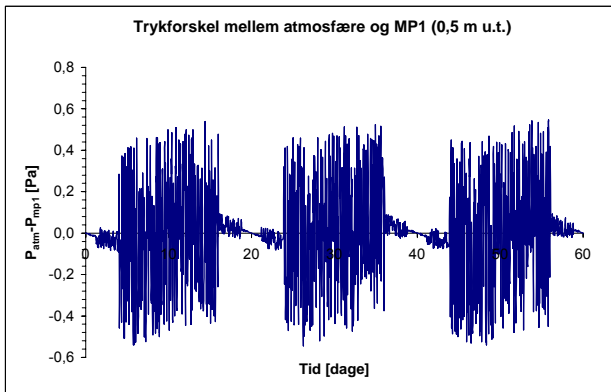
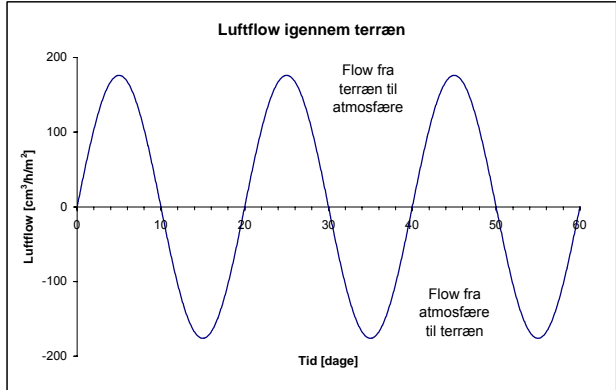
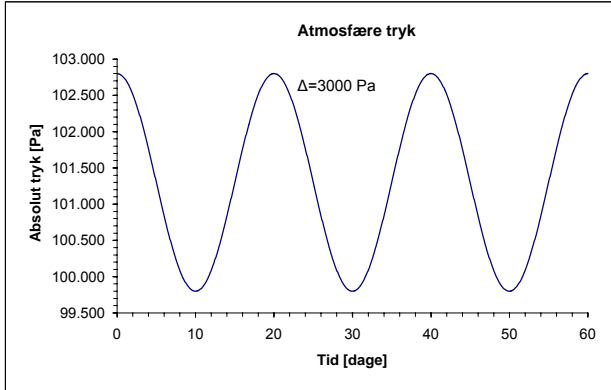
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

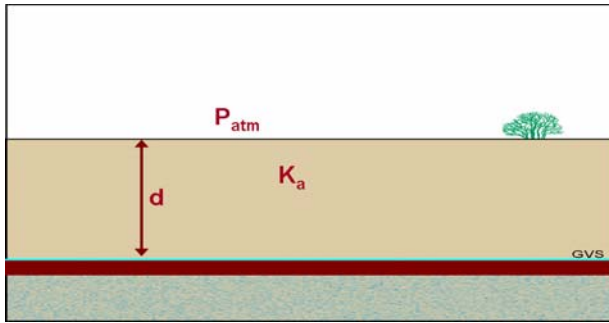
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 3000 Pa, Periode = 20 dage

Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Scenarium 1.12 - Barometer variation



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

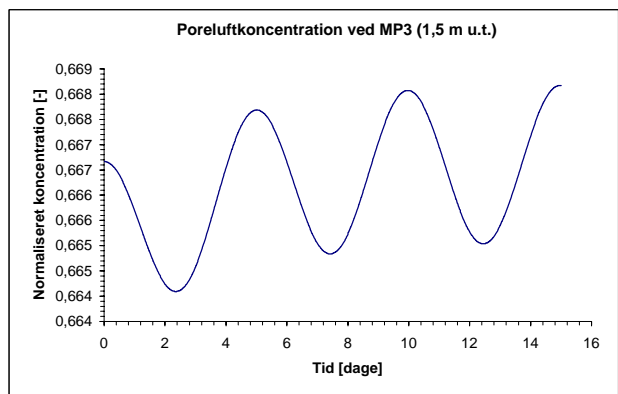
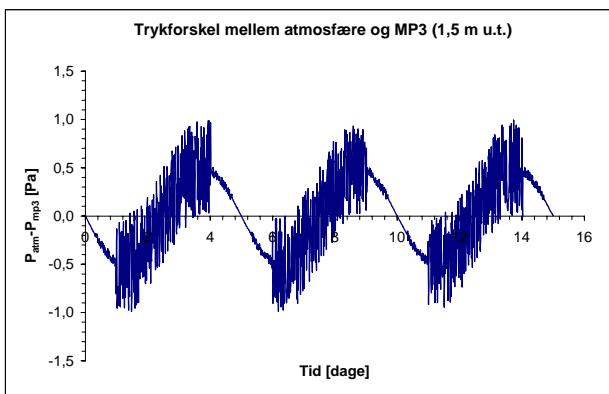
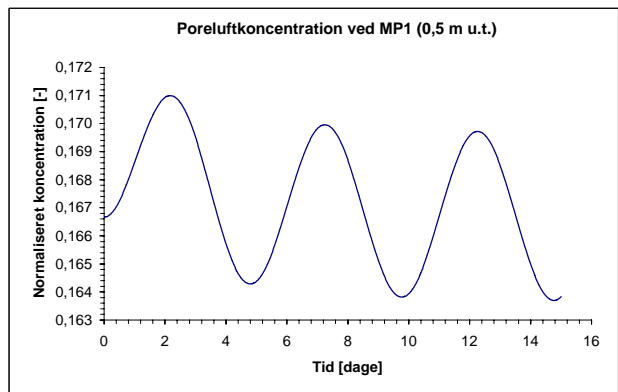
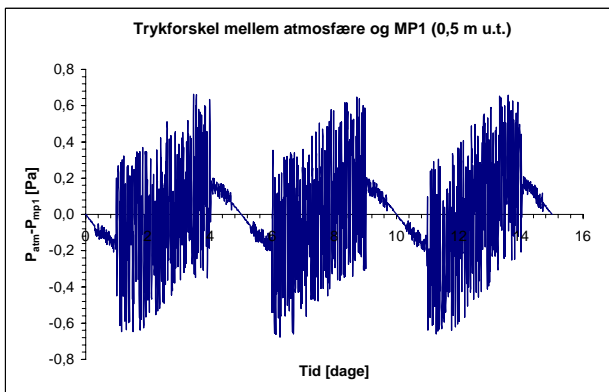
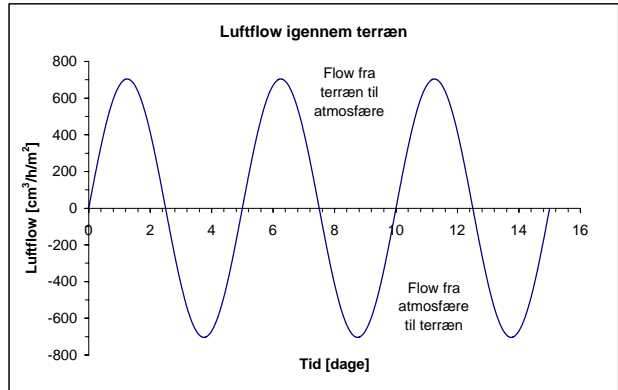
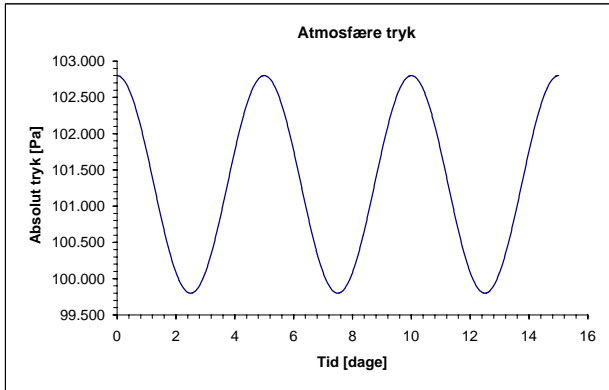
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

Transient atmosfære tryk
Amplitude = 3000 Pa, Periode = 5 dage

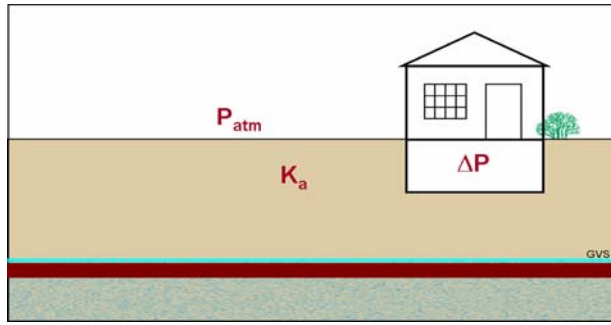
Bygningsmæssige forhold

Igen bebyggelse



Bilag B

Scenarium 2.1 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

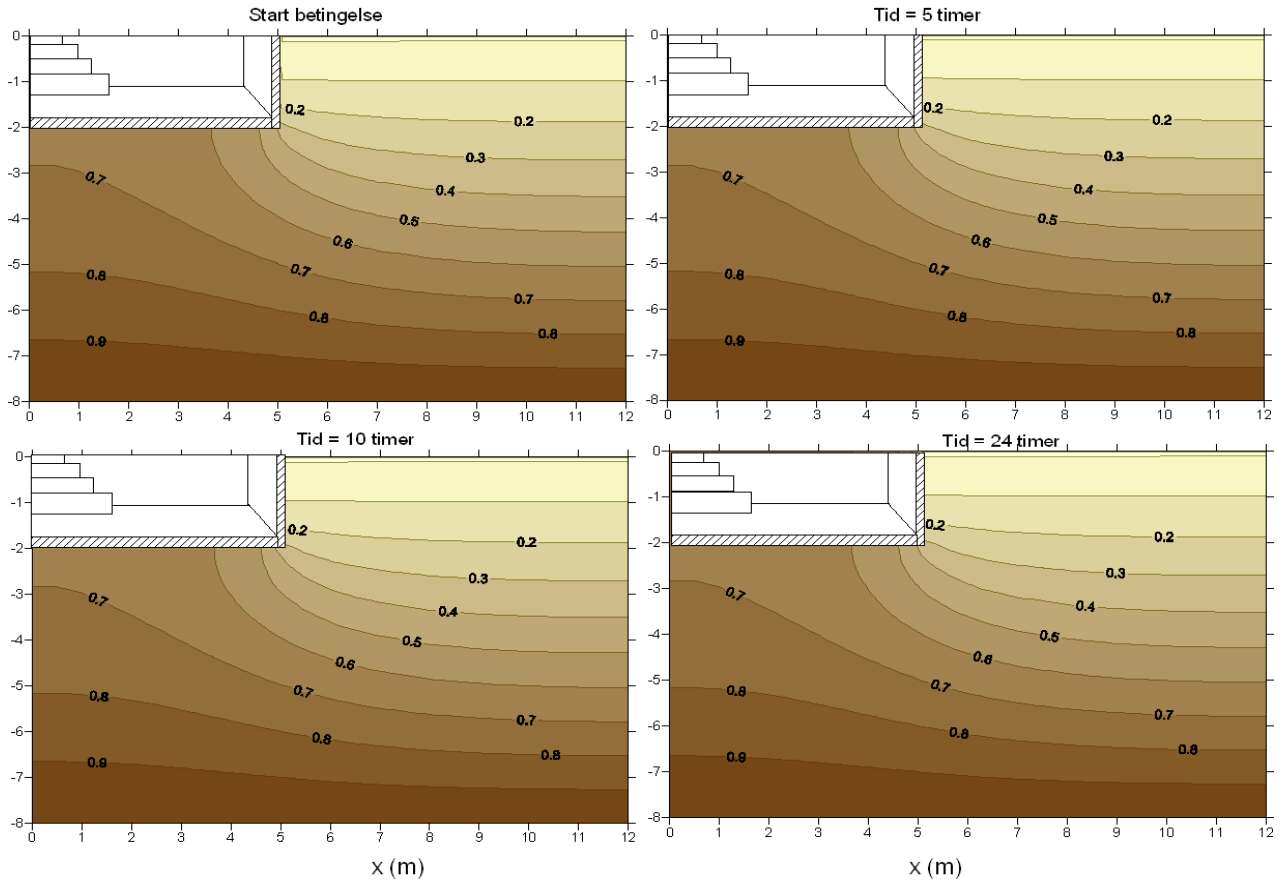
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

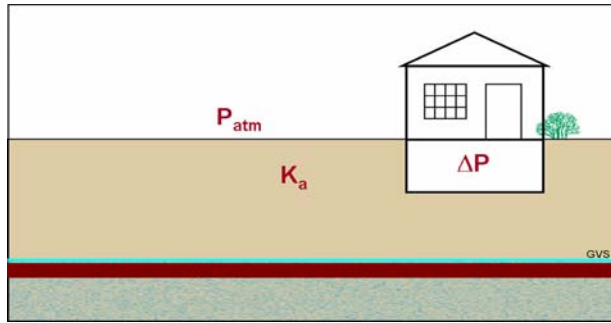
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 2.1 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

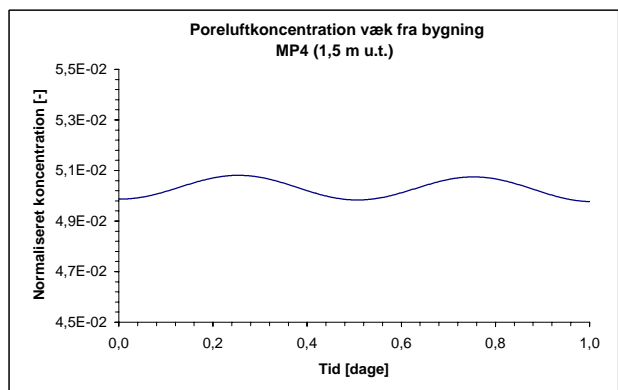
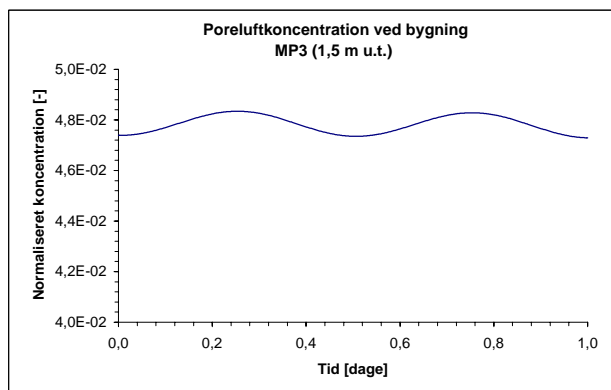
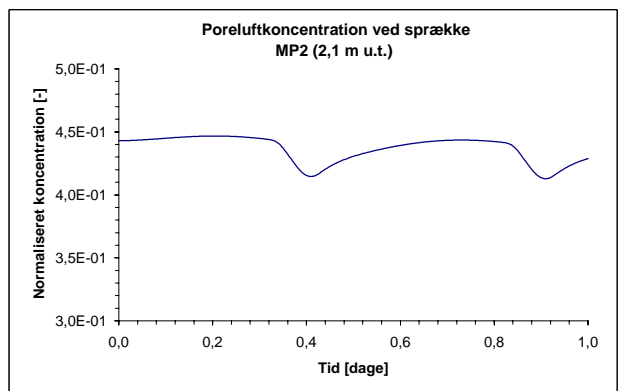
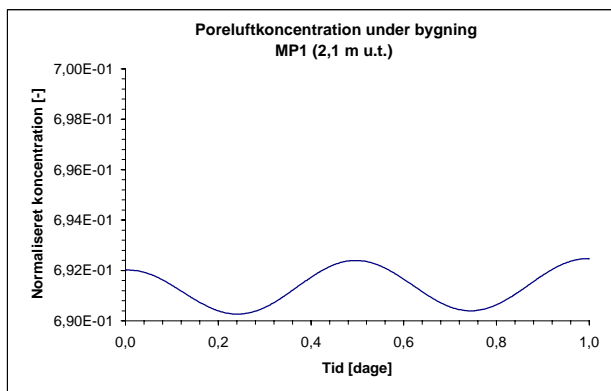
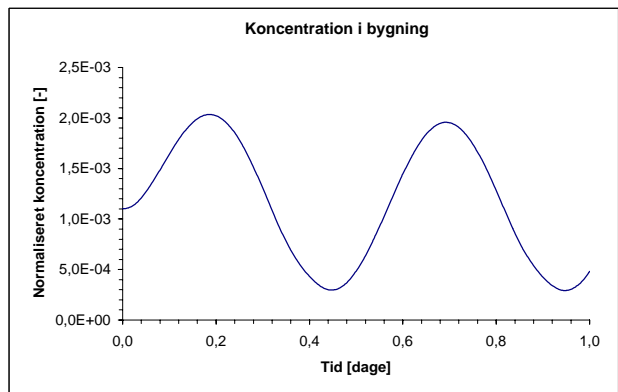
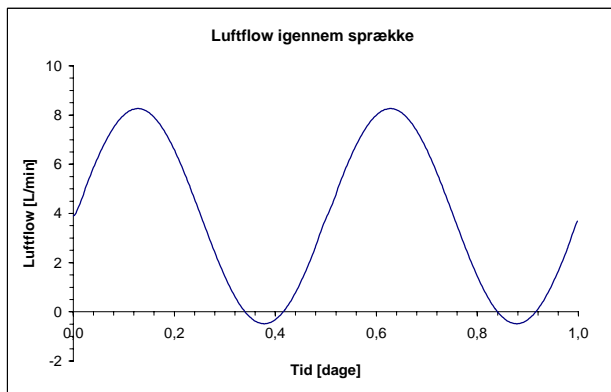
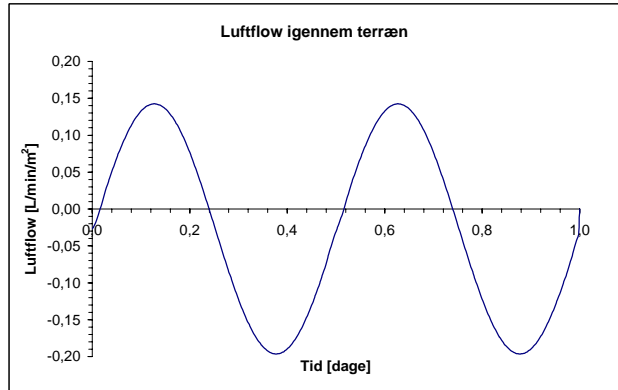
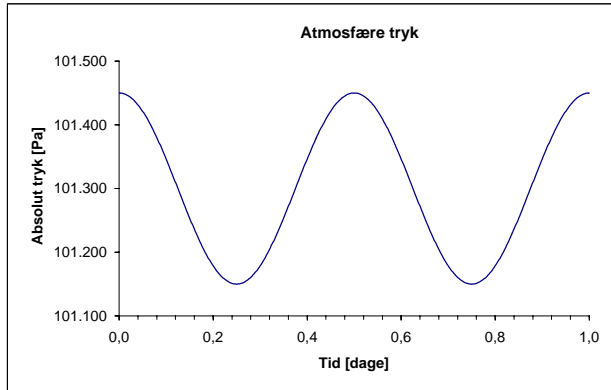
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

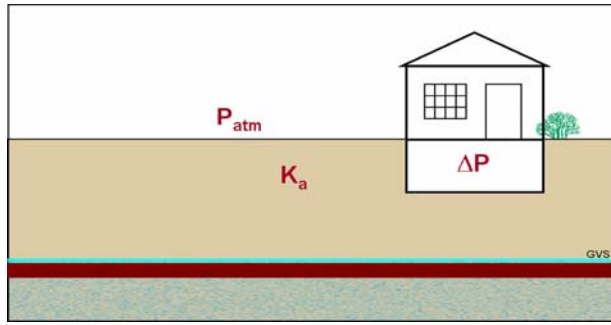
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 2.2 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

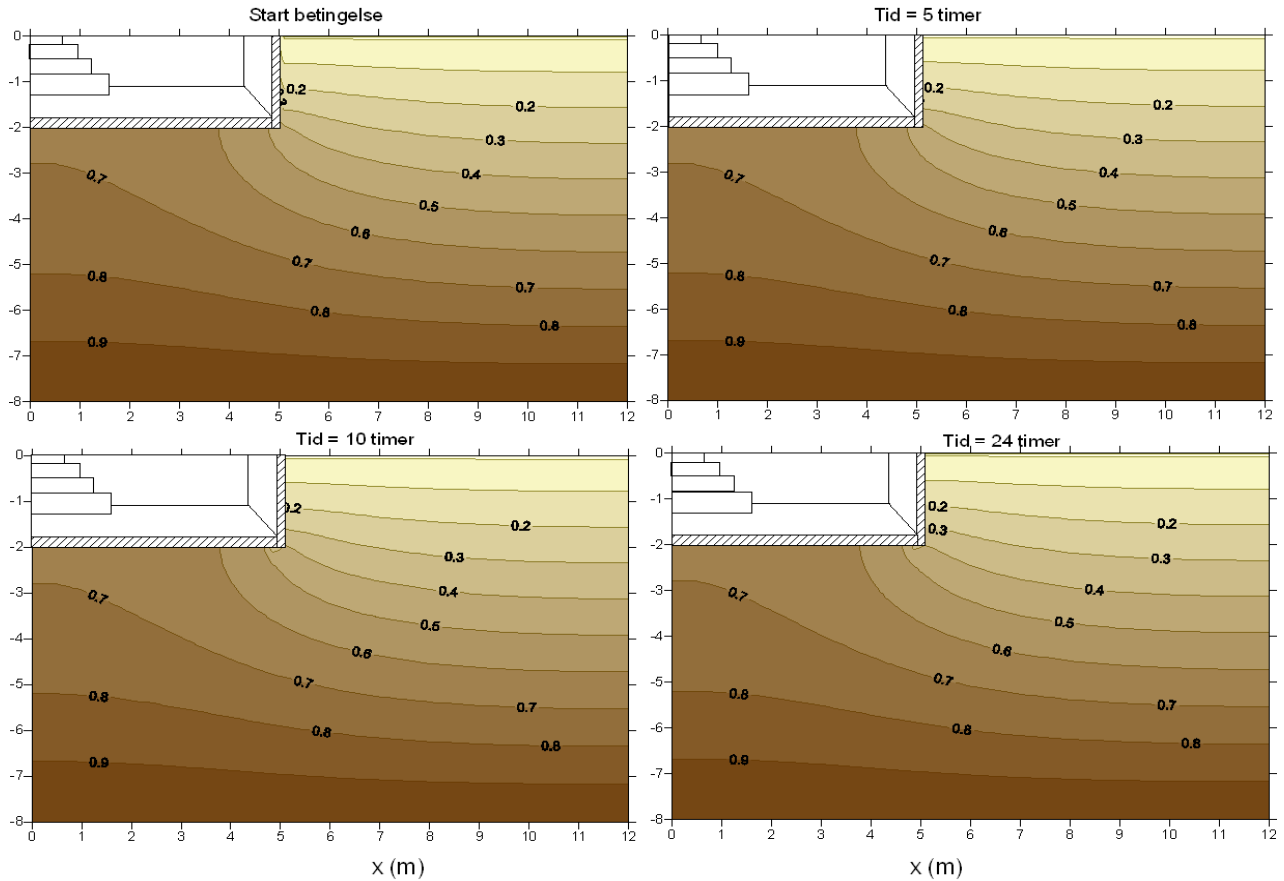
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

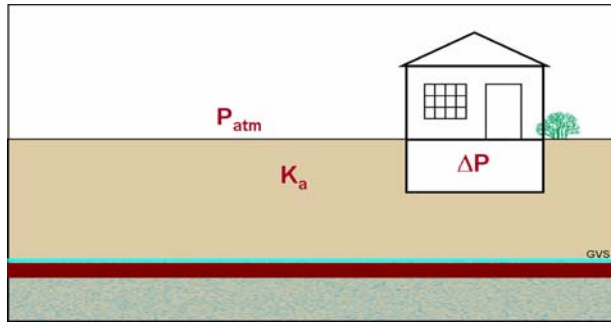
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 2.2 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

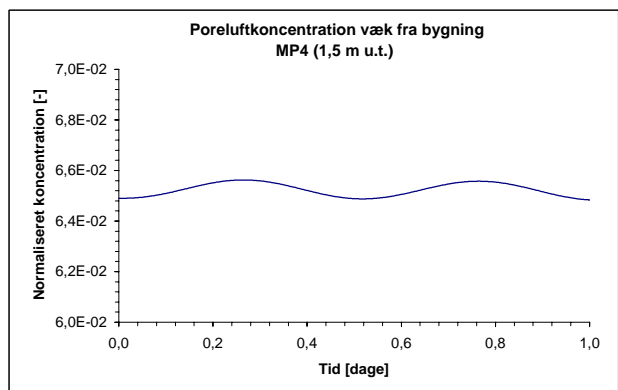
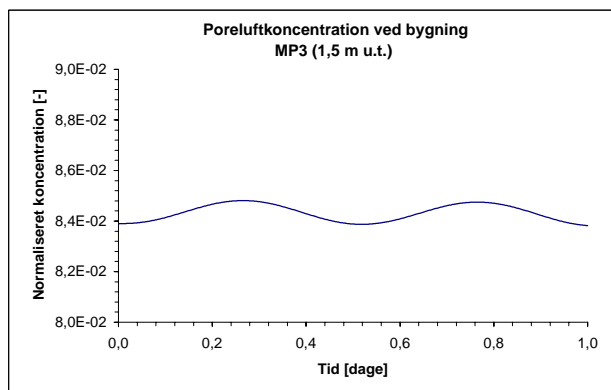
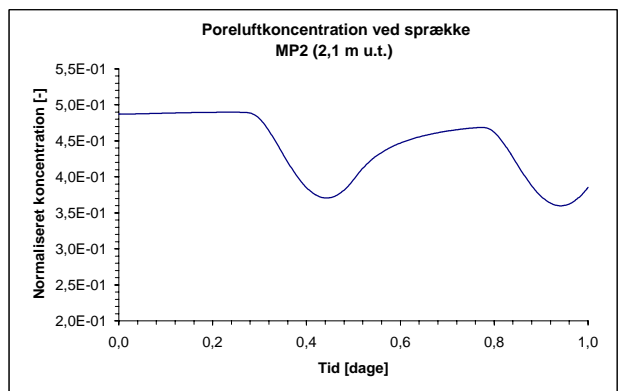
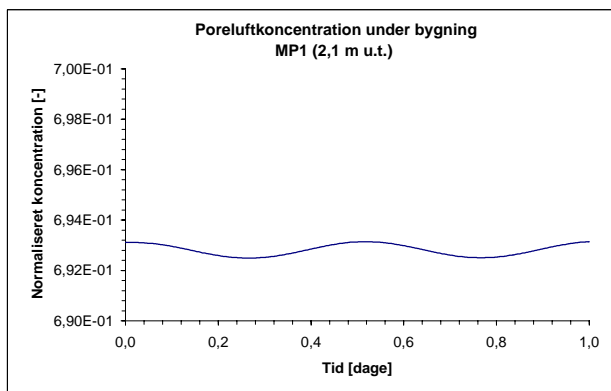
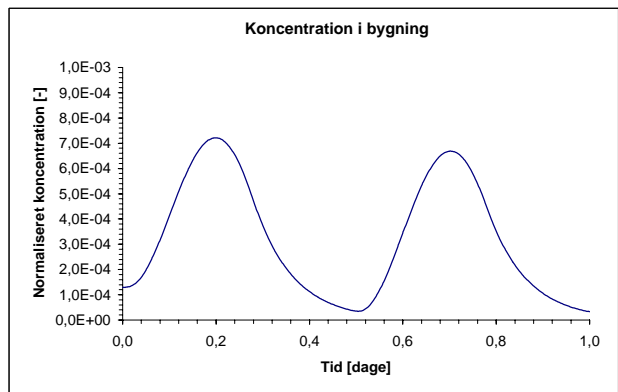
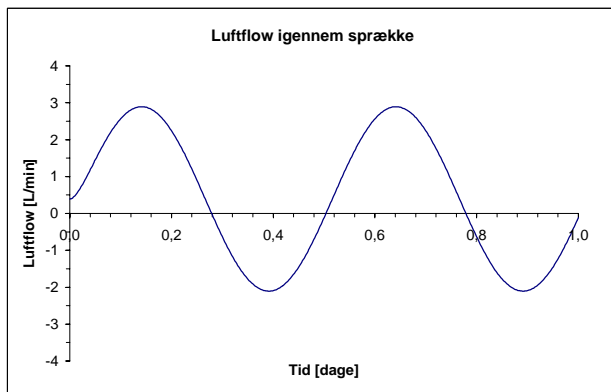
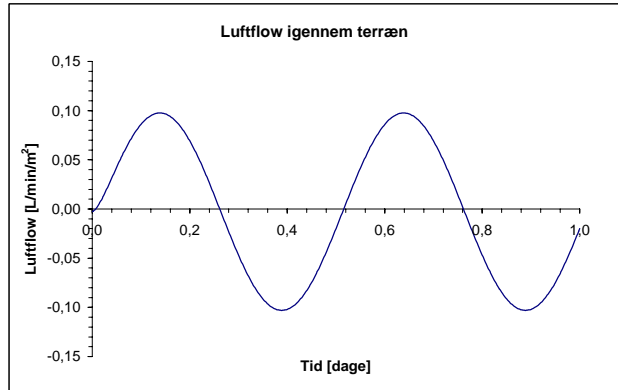
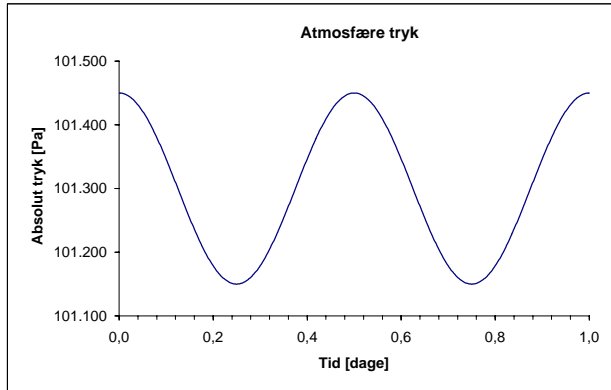
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

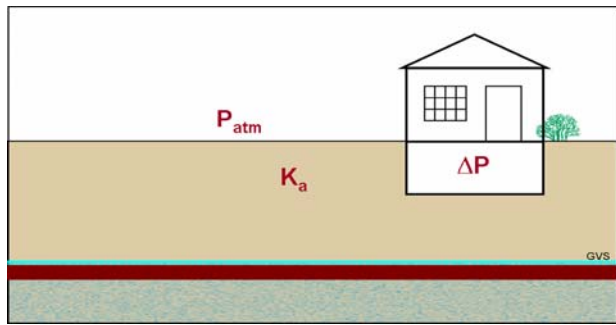
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 2.3 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

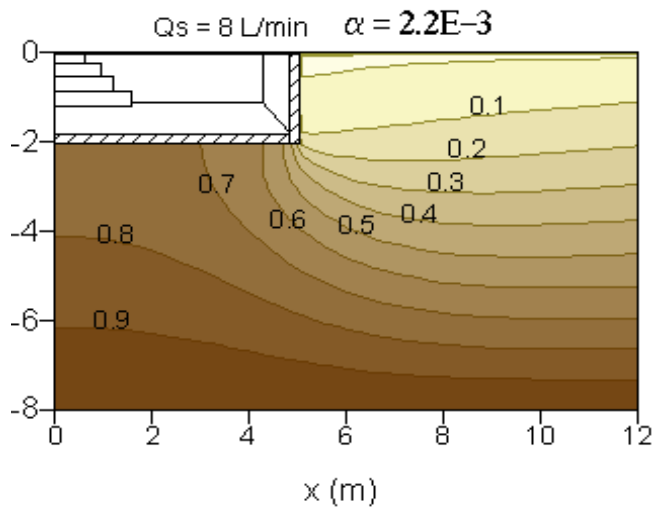
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

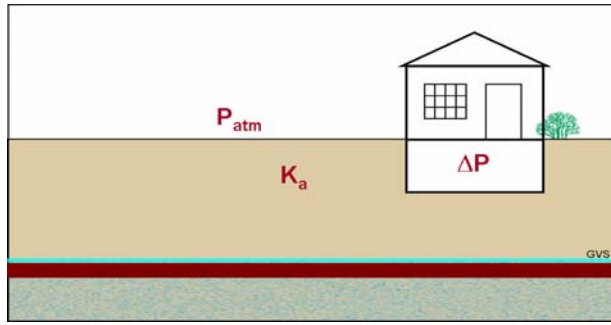
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 10 Pa undertryk



Scenarium 2.4 - Indendørs tryk



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

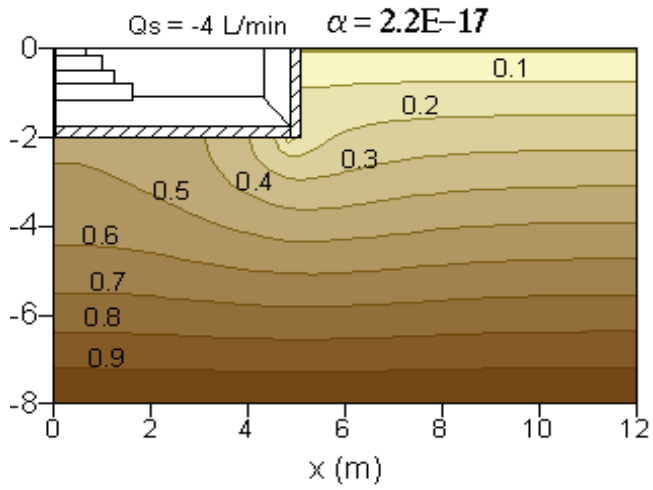
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

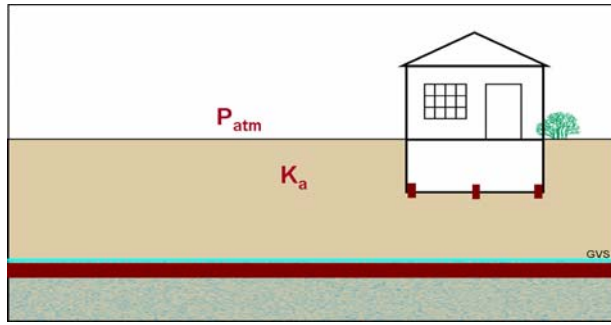
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Scenarium 3.1 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

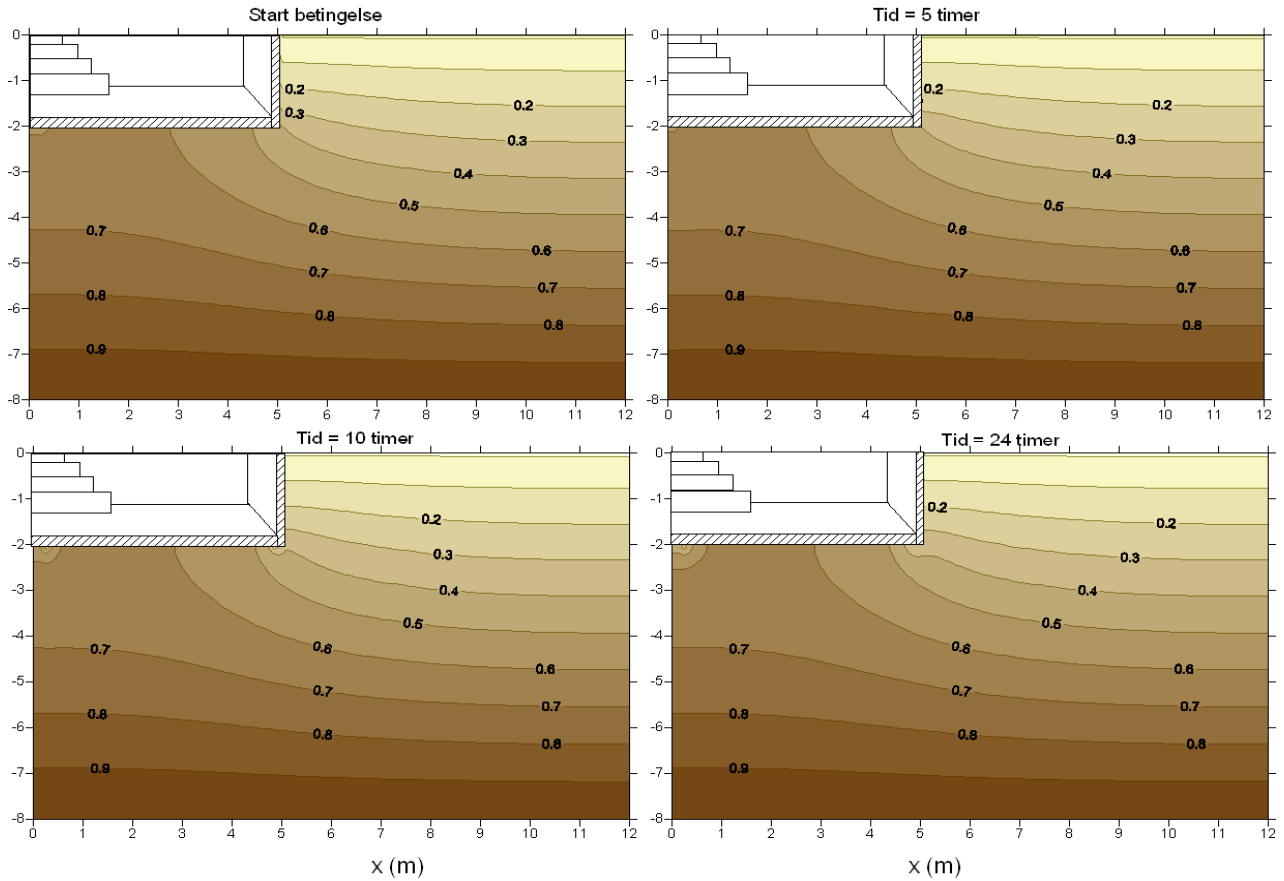
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

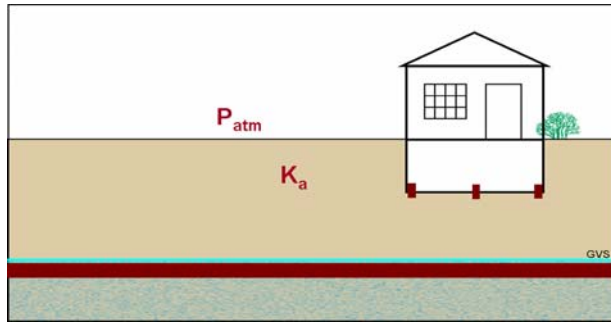
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og midt af fundament
Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 3.1 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

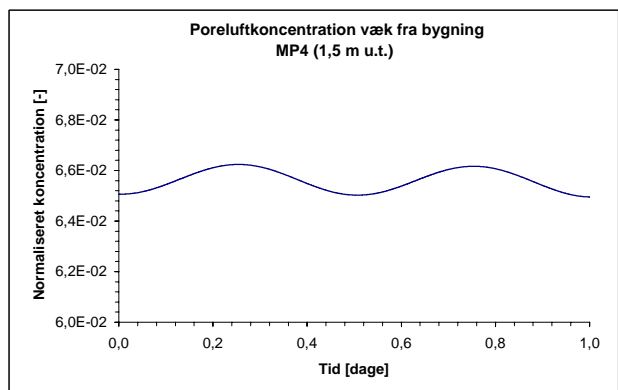
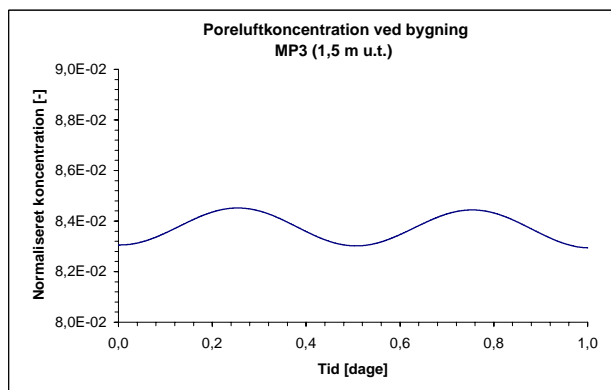
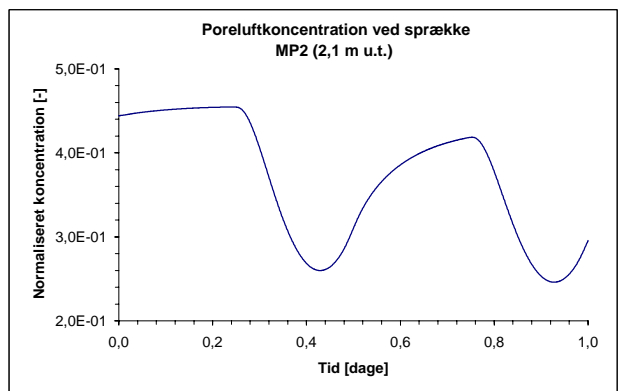
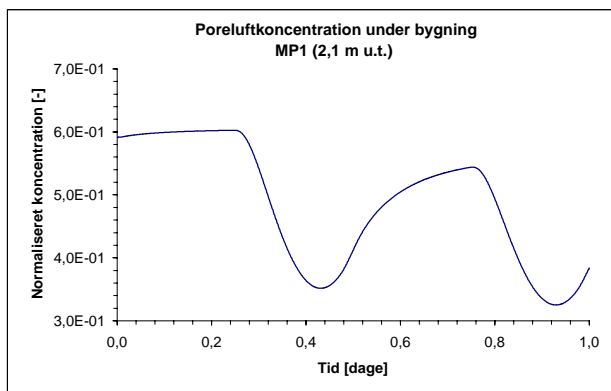
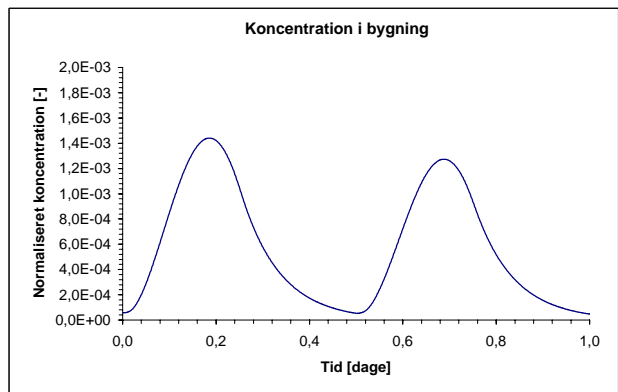
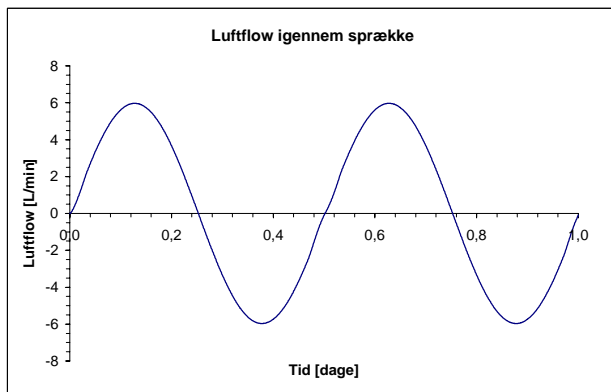
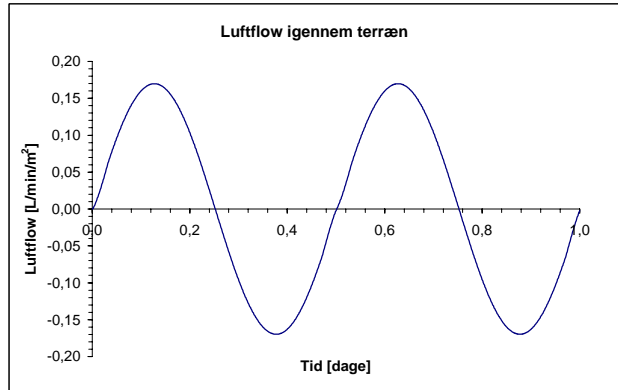
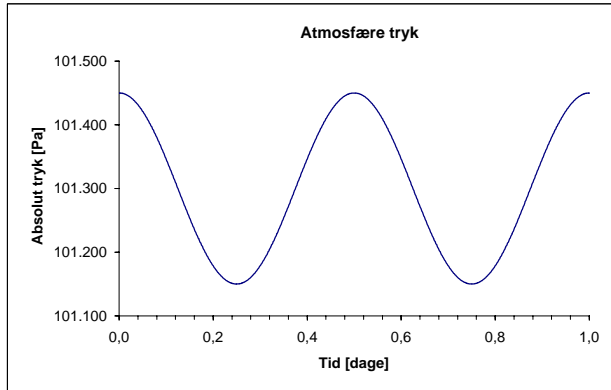
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

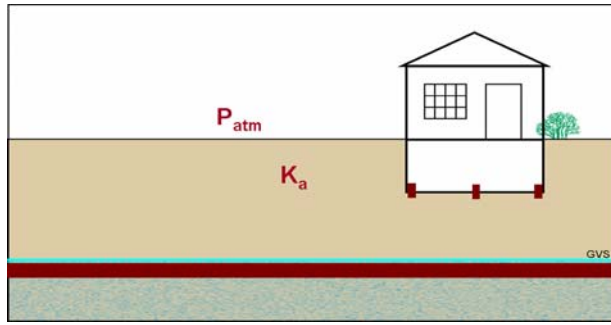
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og midt af fundament
Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 3.2 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

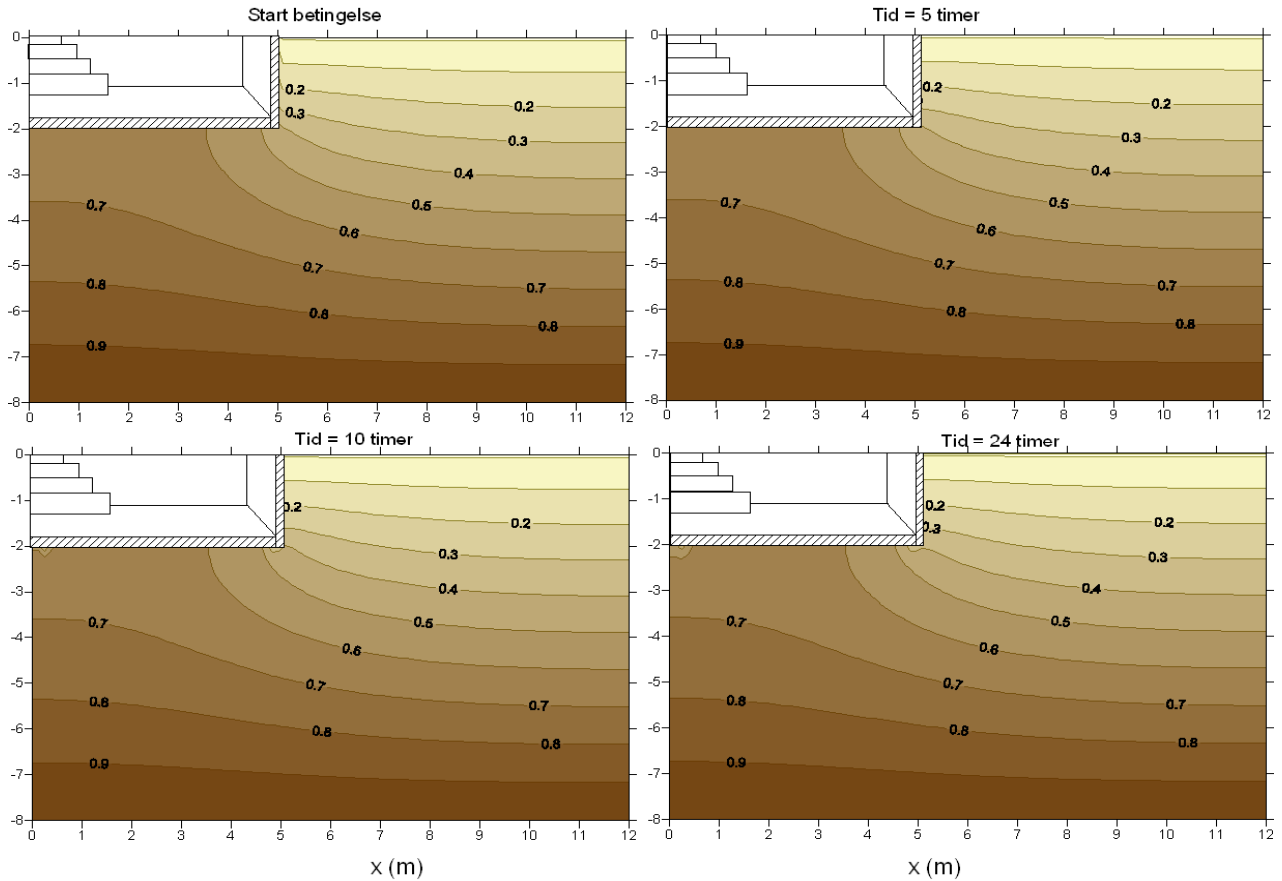
Homogen, fin sand
 $K_a = 1E-12 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

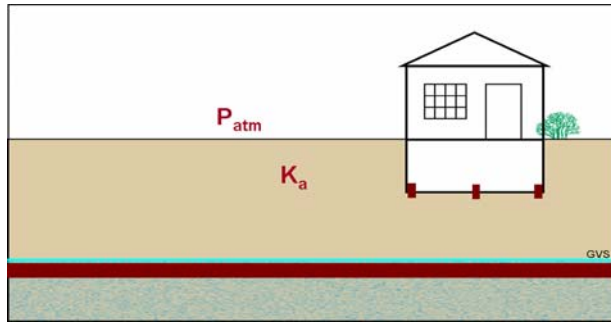
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og midt af fundament
Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 3.2 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

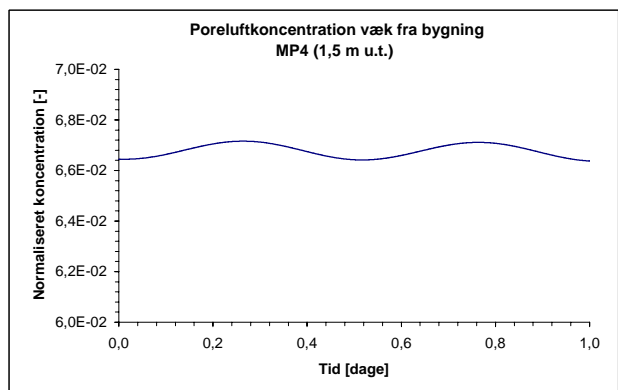
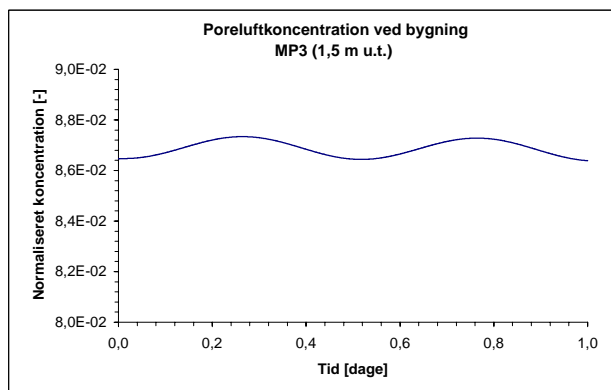
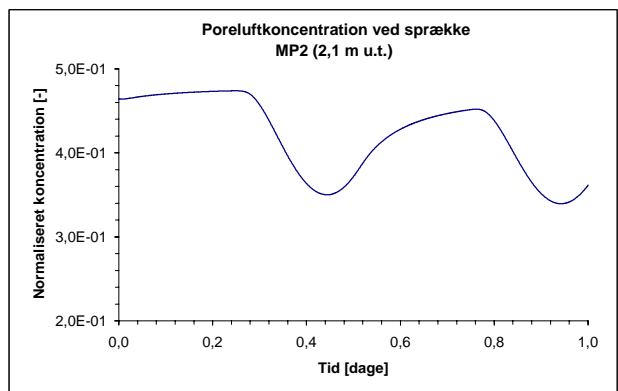
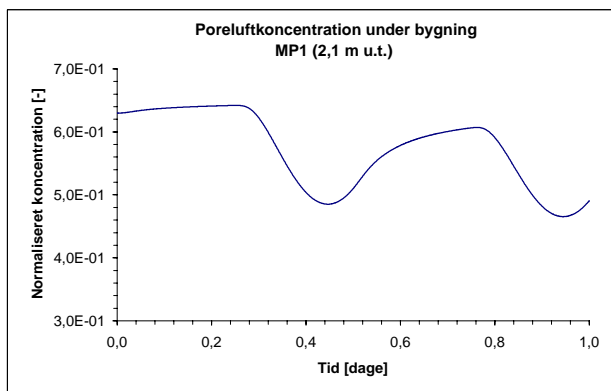
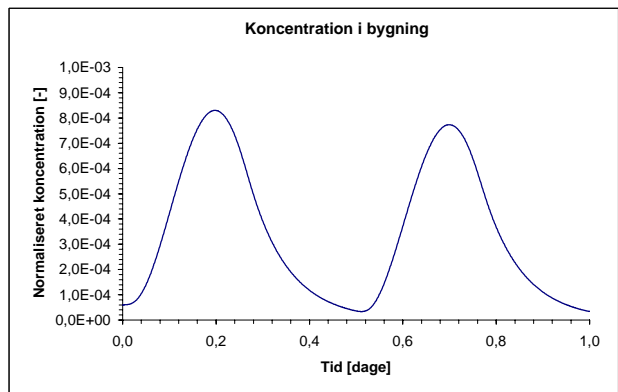
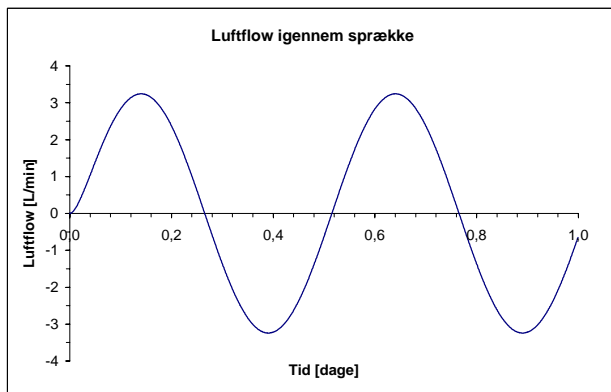
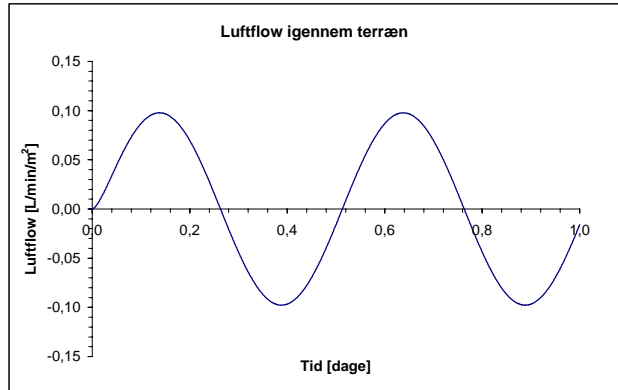
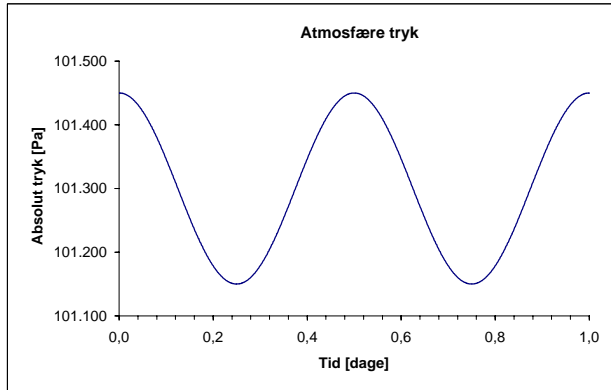
Homogen, fin sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

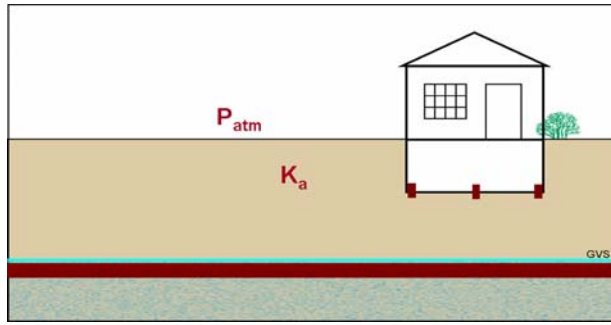
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og midt af fundament
Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 3.3 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

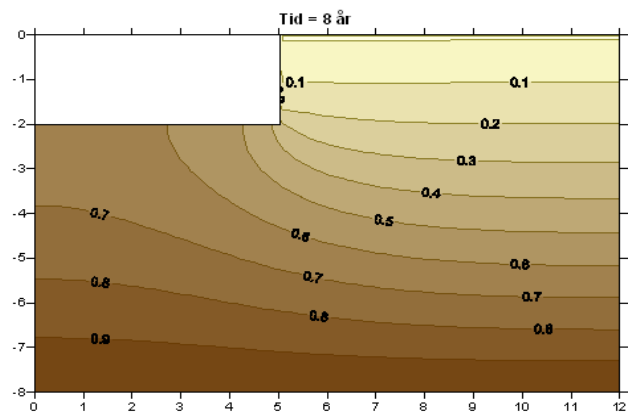
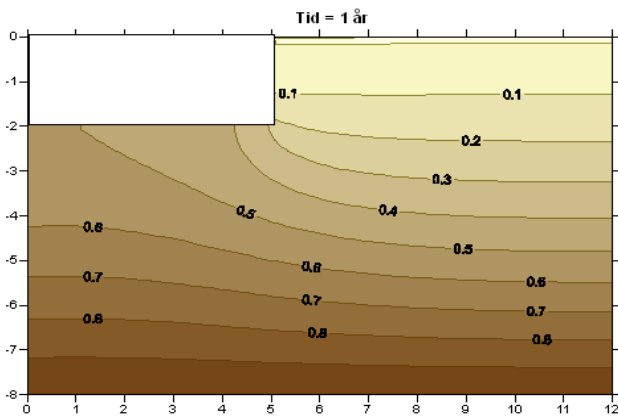
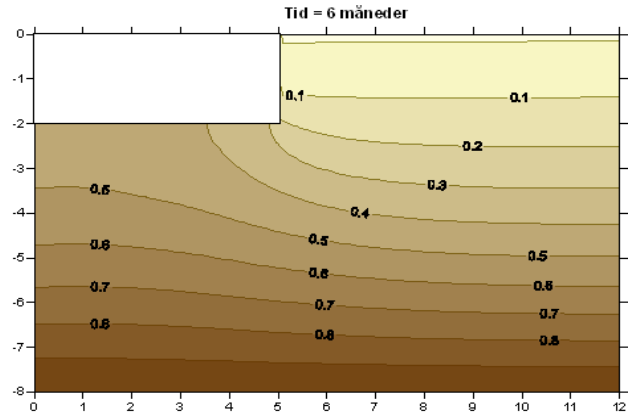
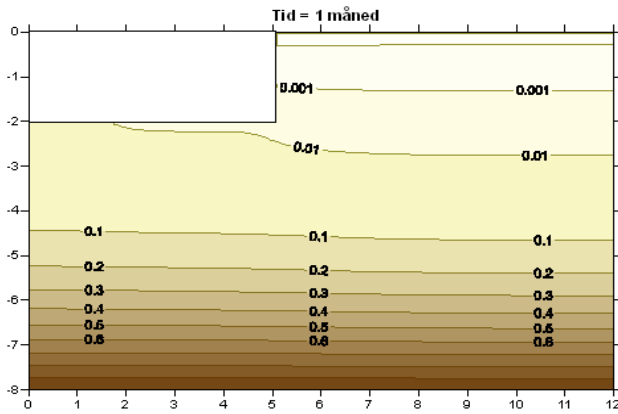
Homogen, medium sand
 $K_a = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

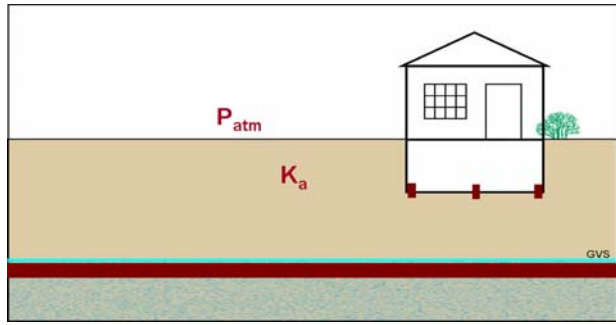
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og midt af fundament
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 3.4 - Sprække placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

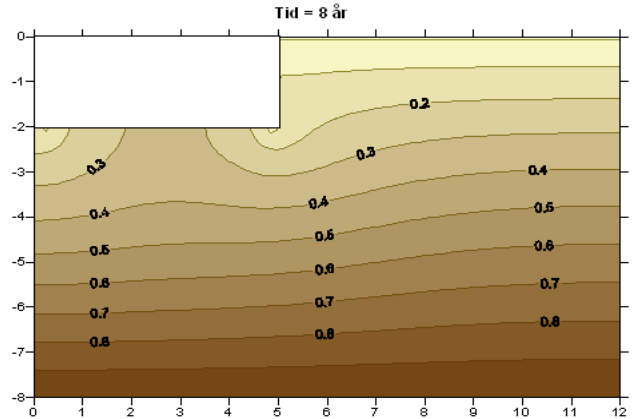
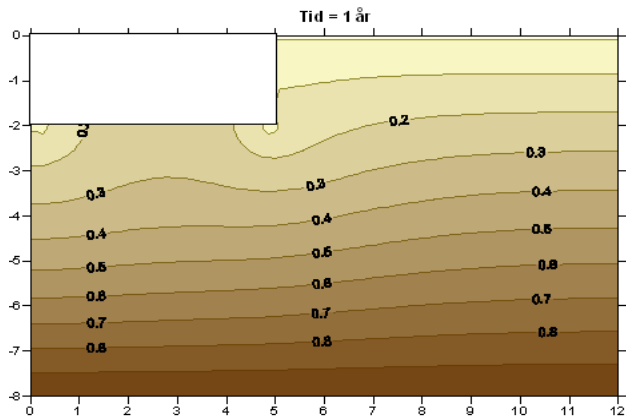
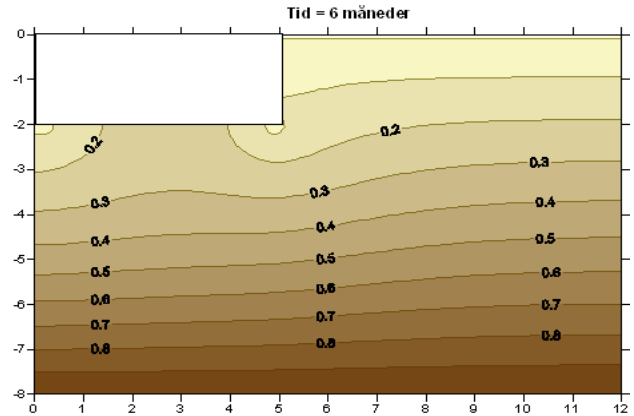
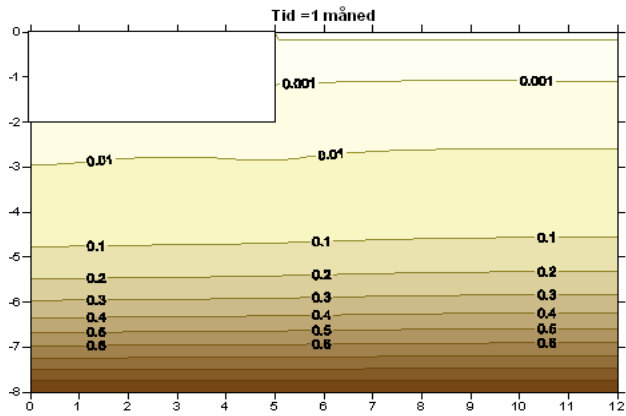
Homogen, medium sand
 $K_a = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

Steady state

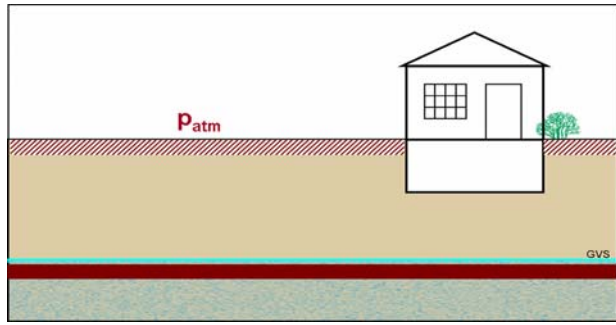
Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Bilag D

Scenarium 4.1 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

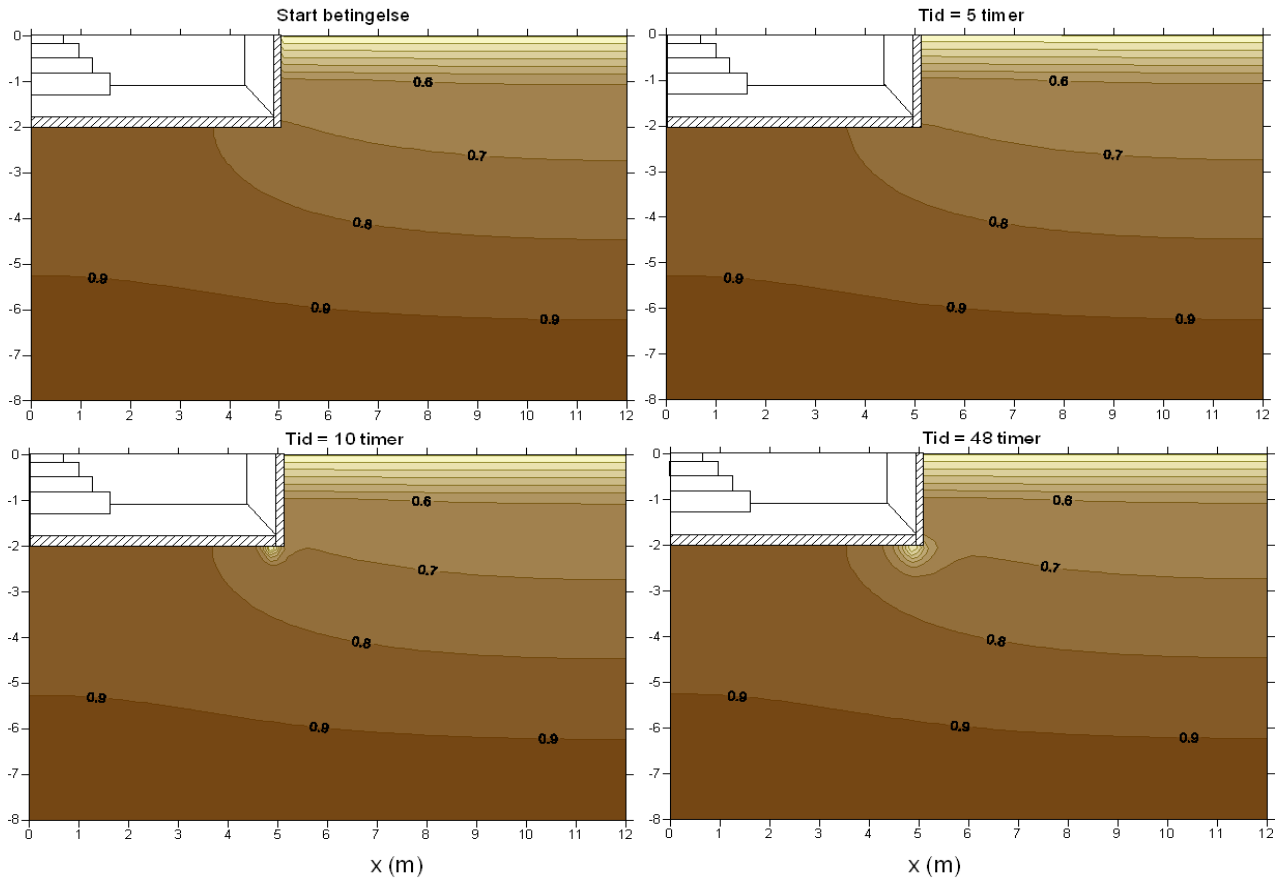
Lagdeling type A, medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

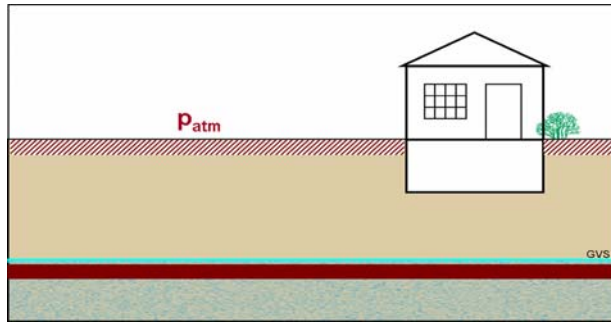
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.1 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

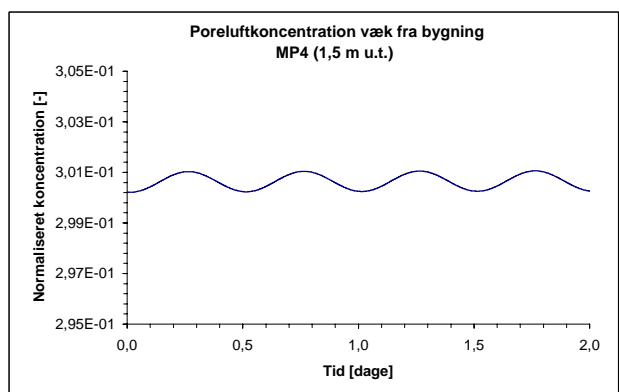
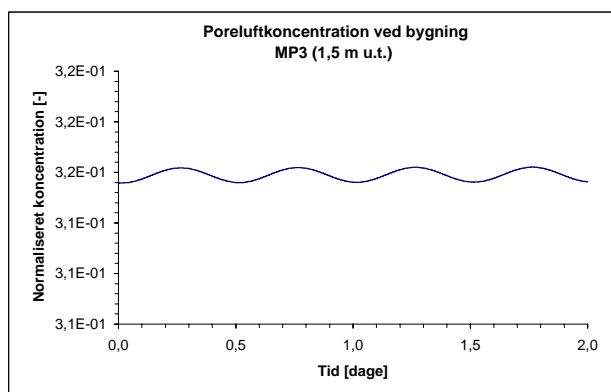
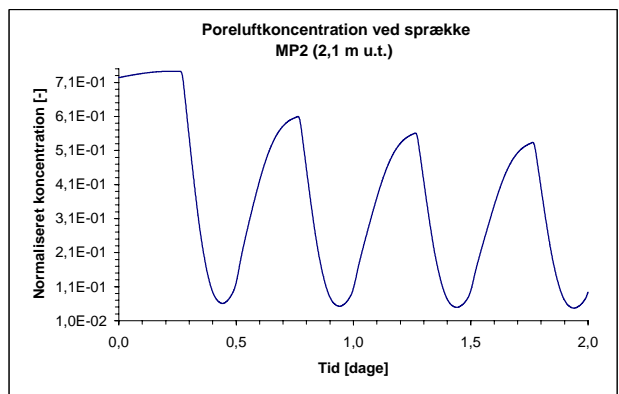
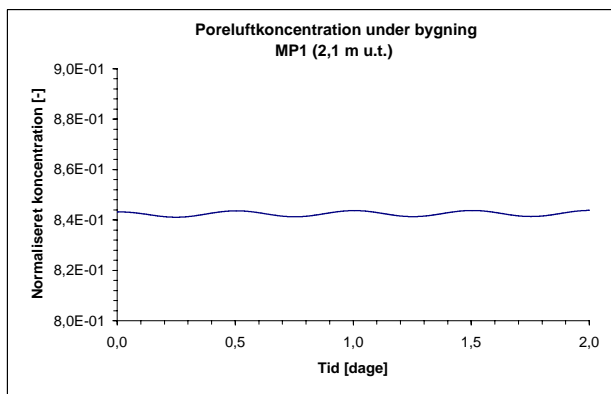
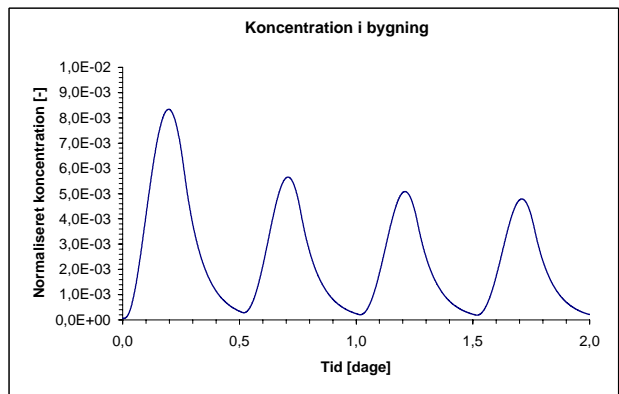
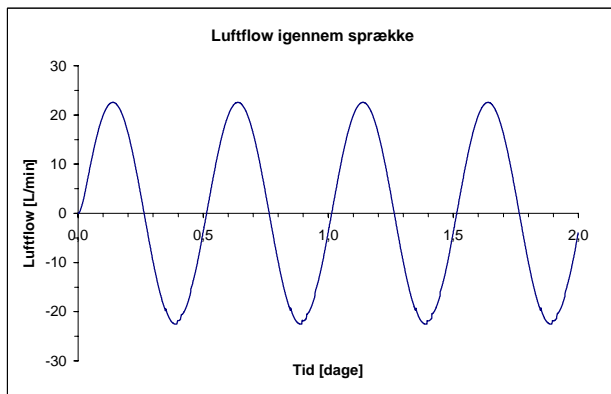
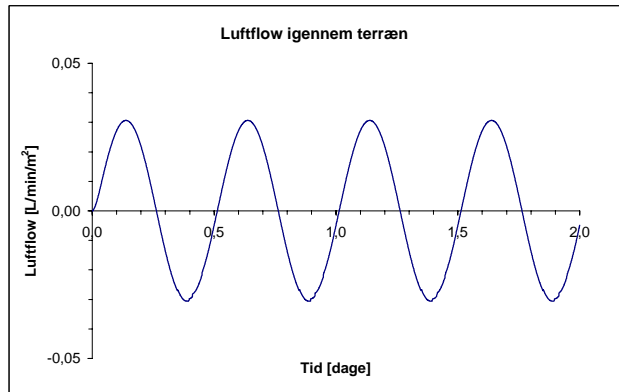
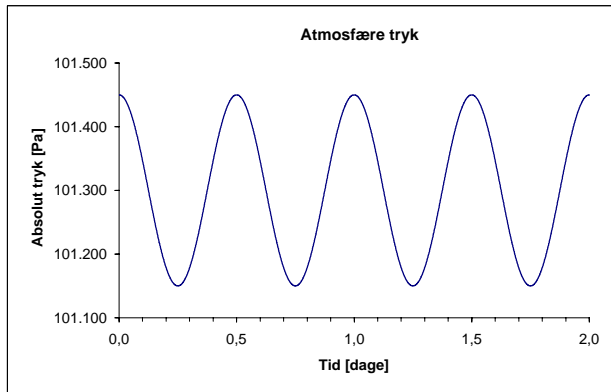
Lagdeling type A, medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

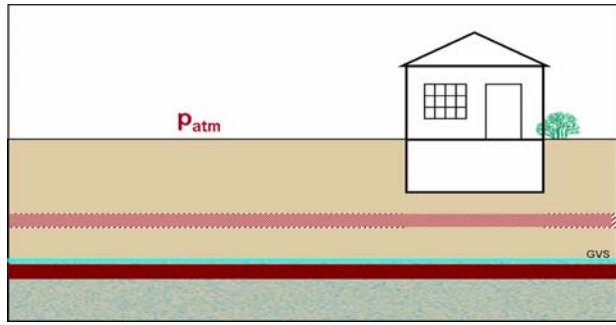
Transient atmosfære tryk
Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.2 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

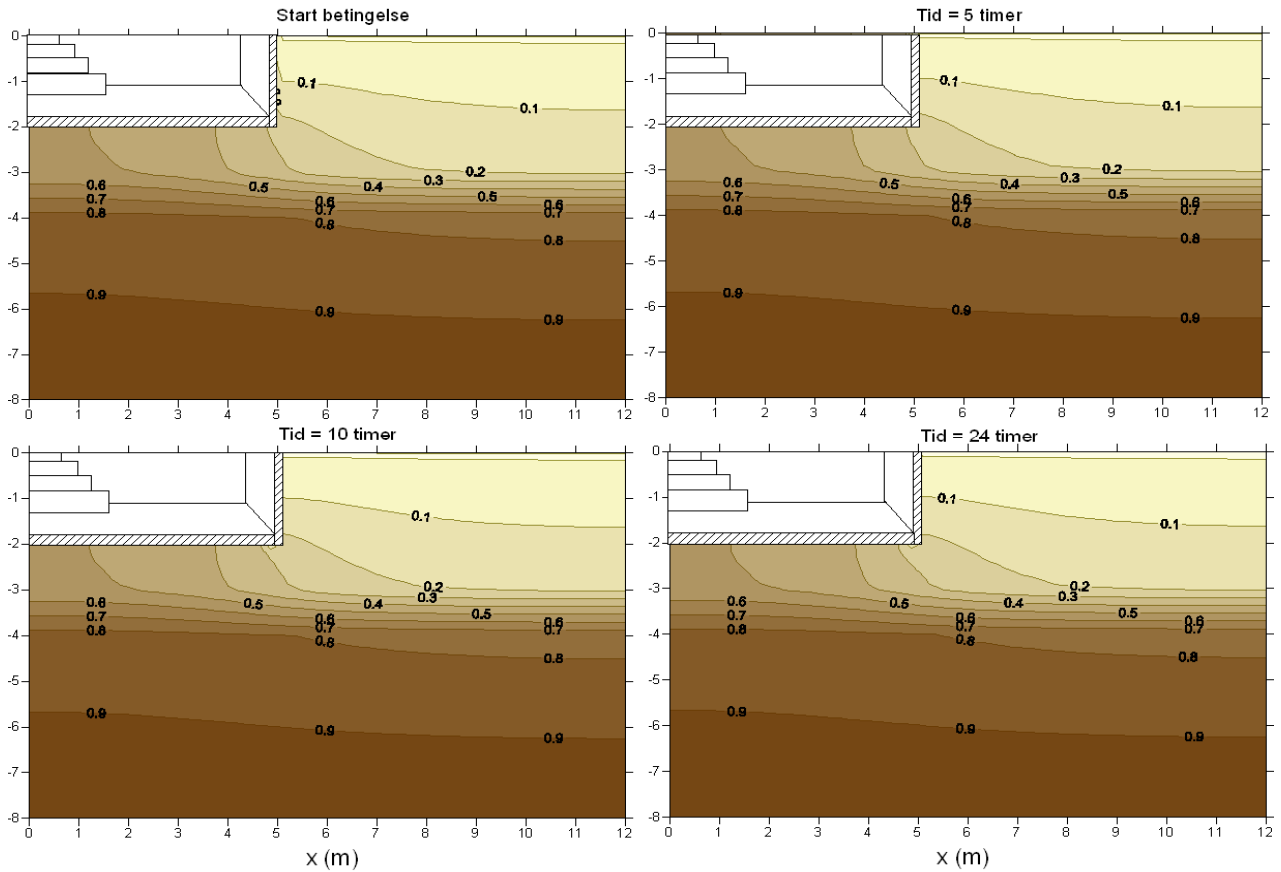
Lagdeling type B, medium sand
 $K_{s1}=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2}=1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

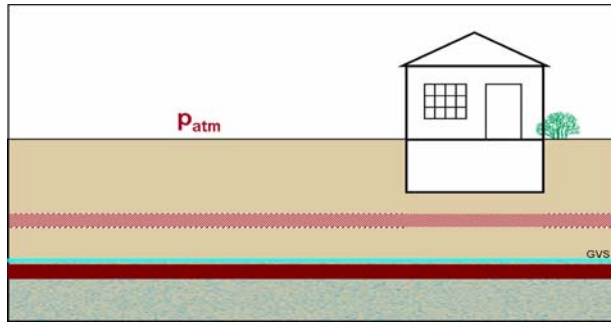
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.2 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

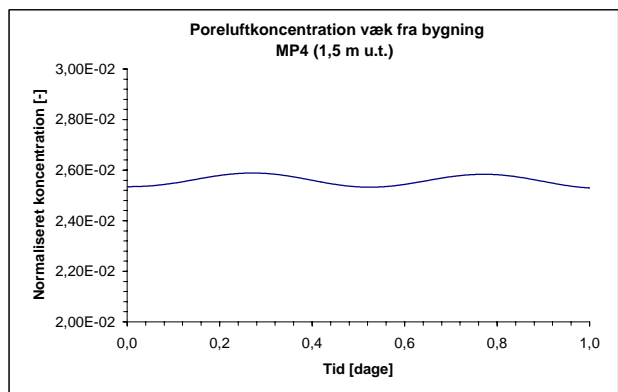
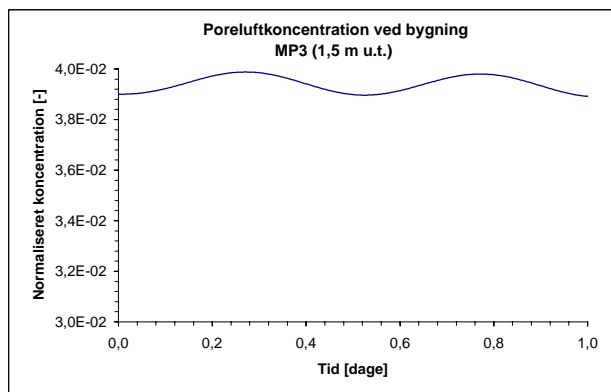
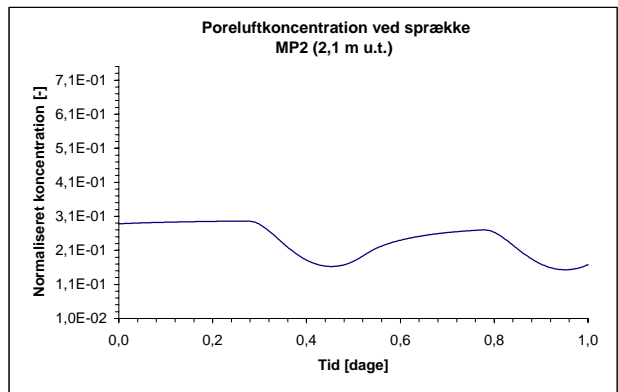
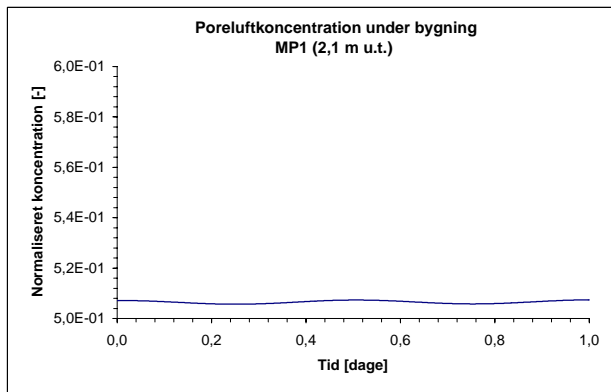
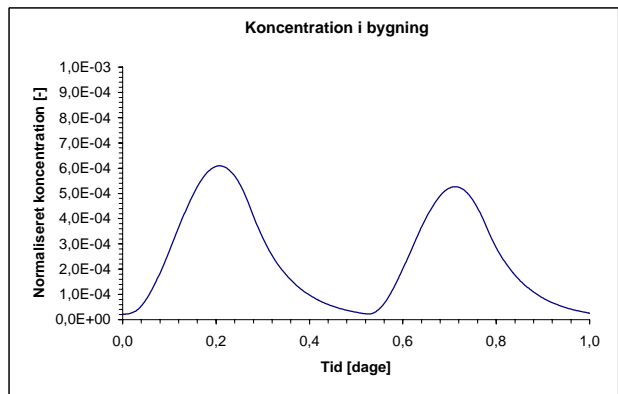
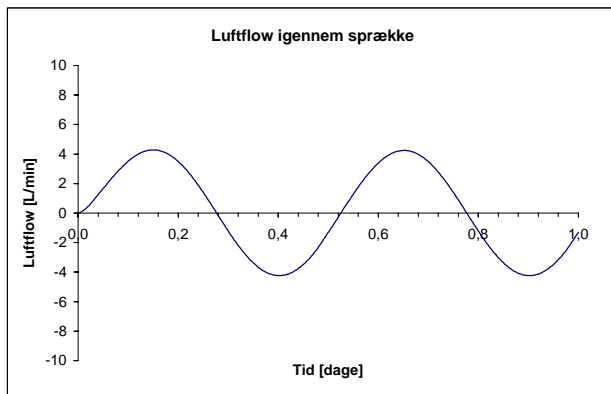
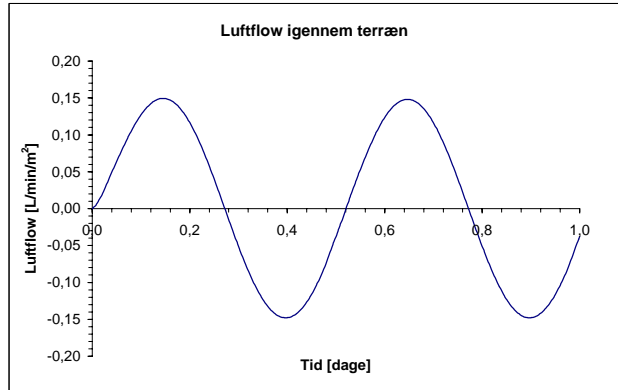
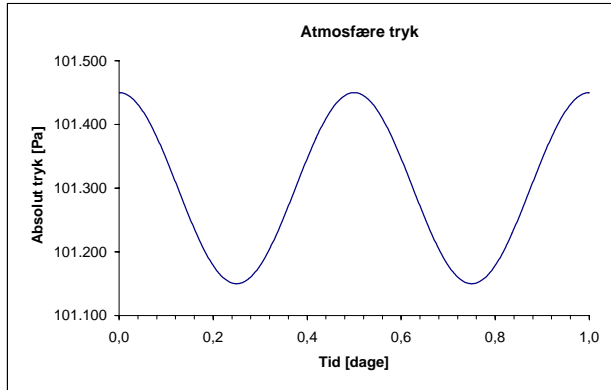
Lagdeling type B, medium sand
 $K_{s1}=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2}=1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

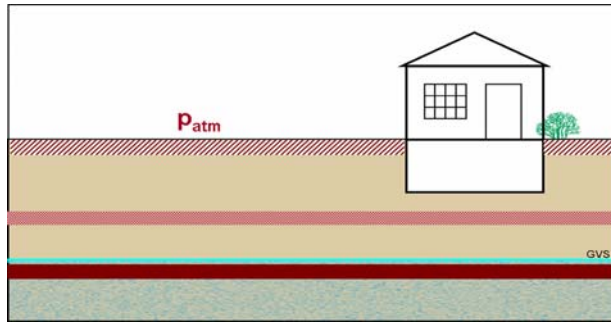
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.3 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

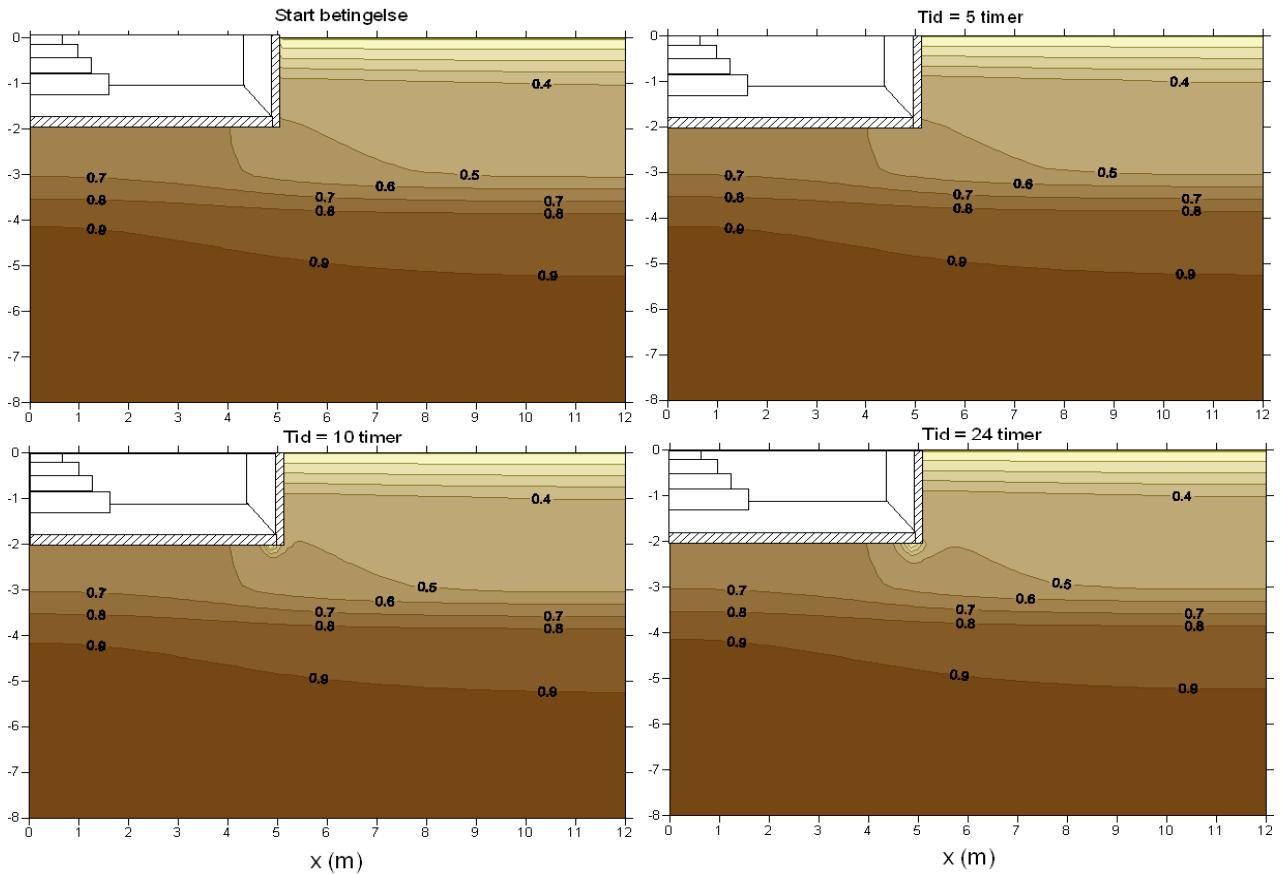
Lagdeling type C, medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

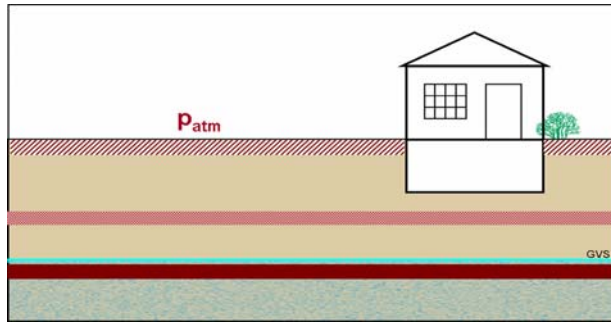
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.3 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

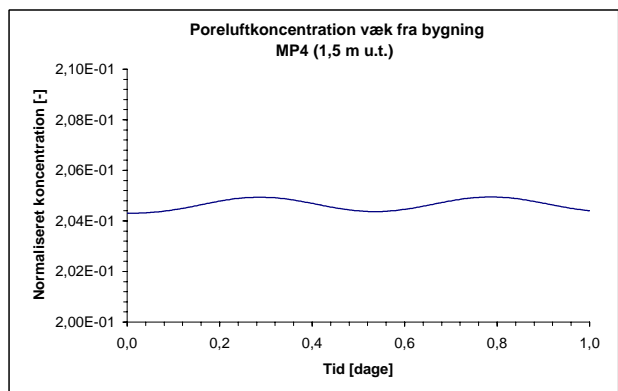
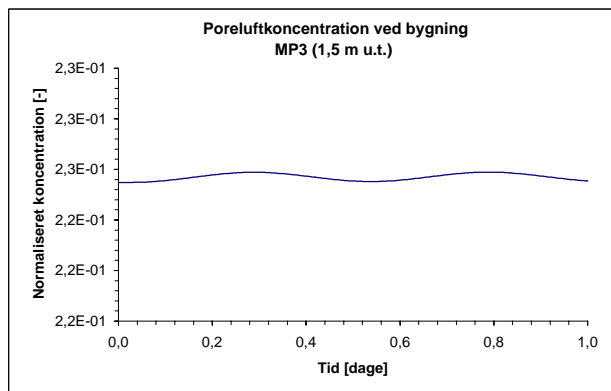
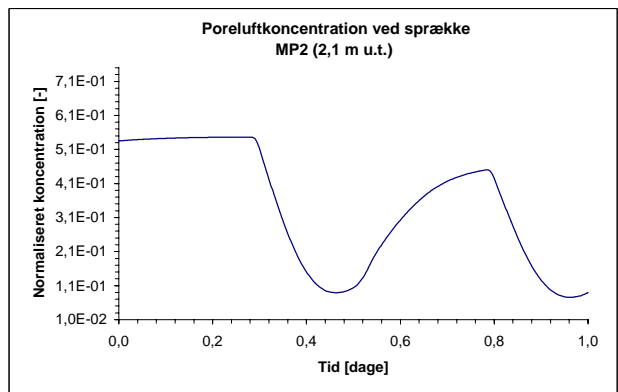
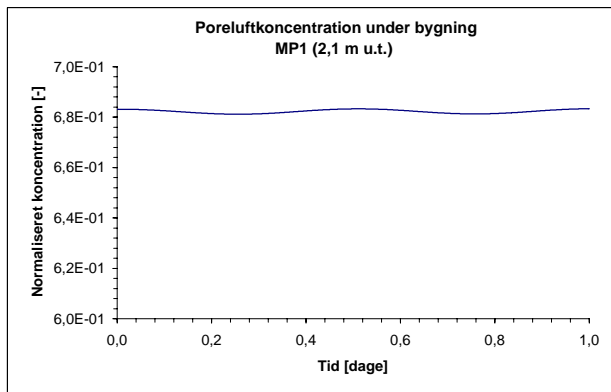
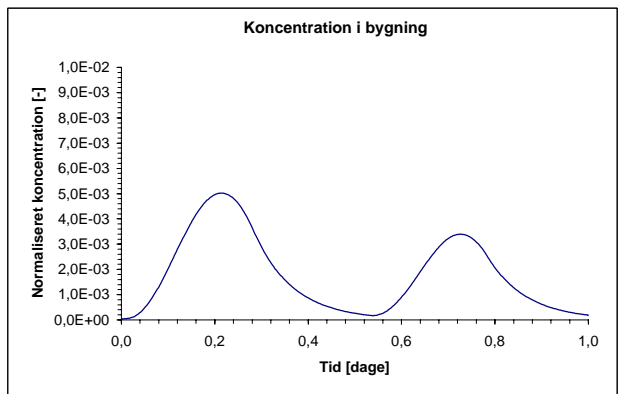
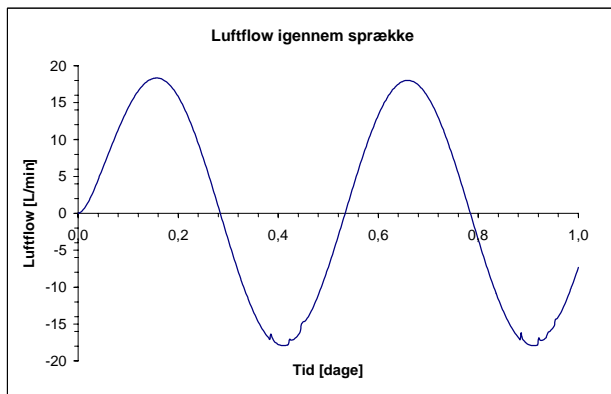
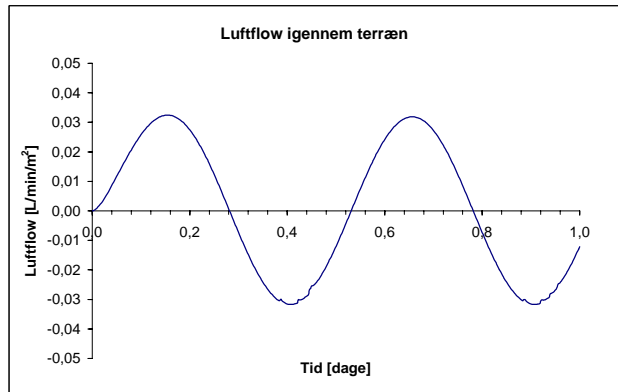
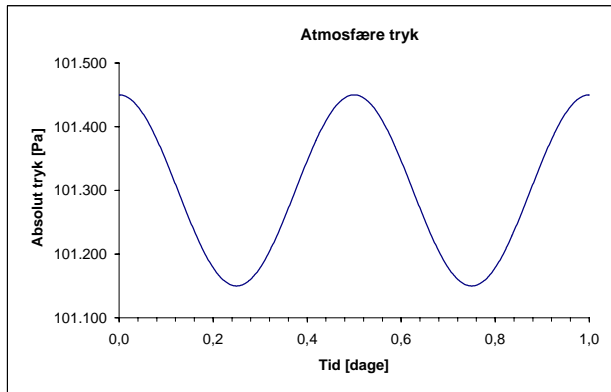
Lagdeling type C, medium sand
 $K_{s1} = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

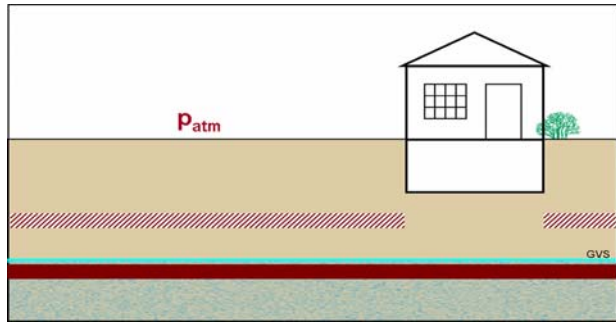
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.4 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

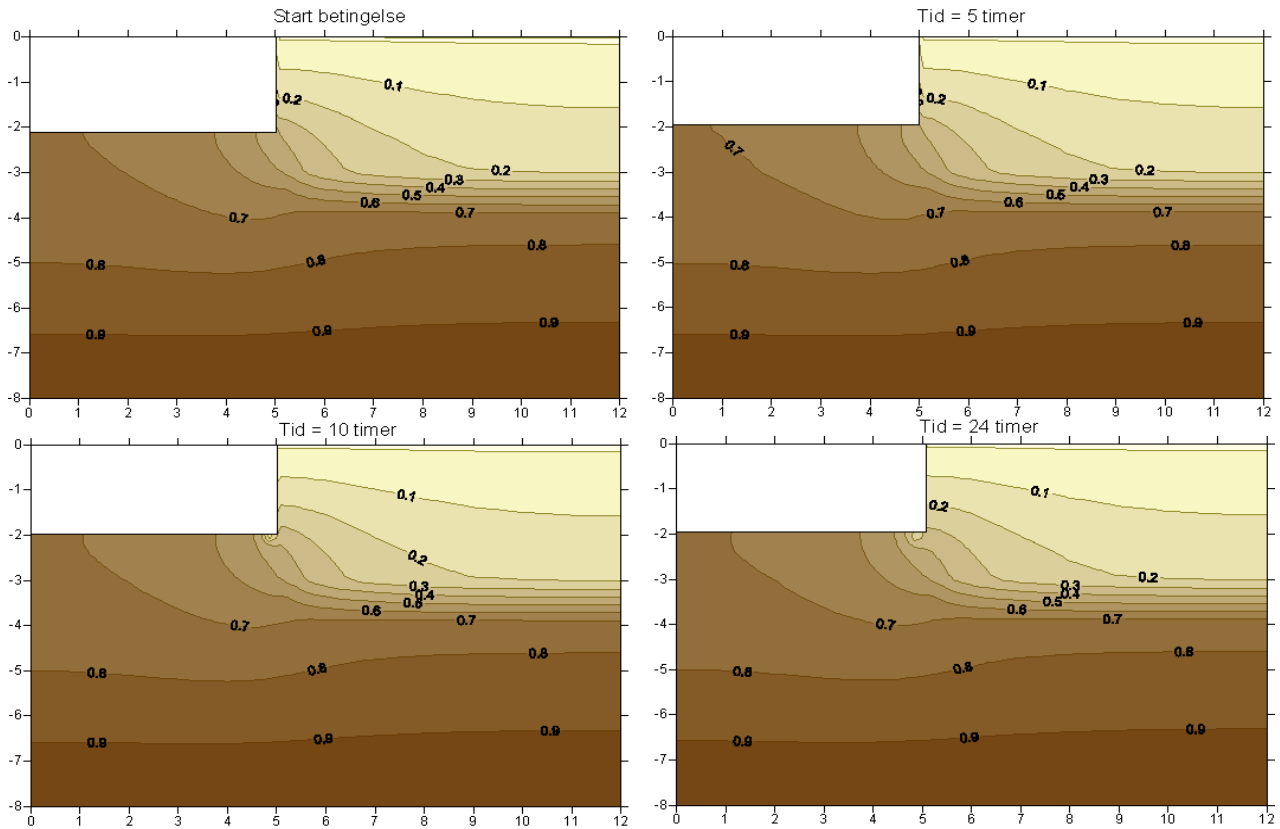
Lagdeling type D, medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

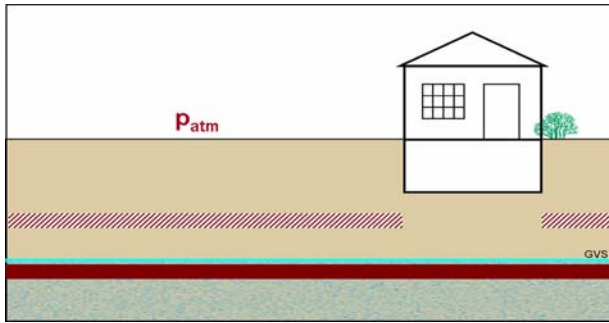
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.4 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

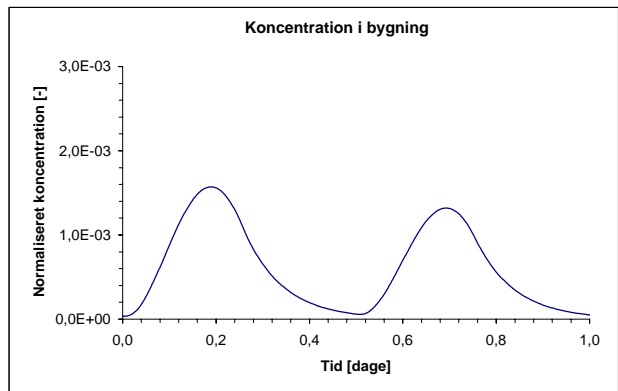
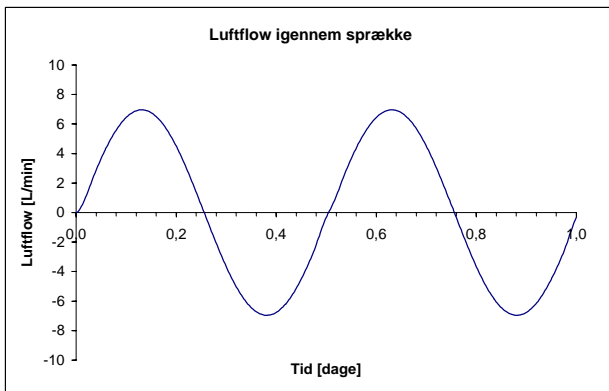
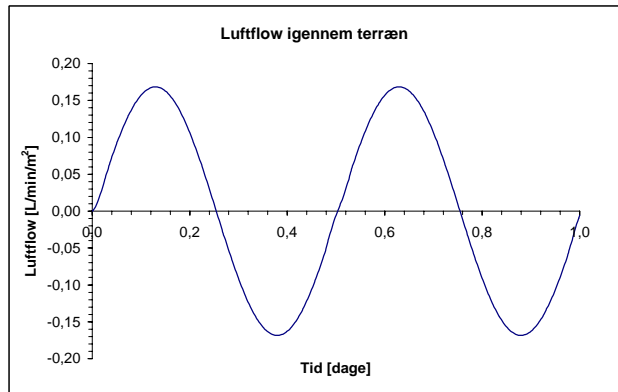
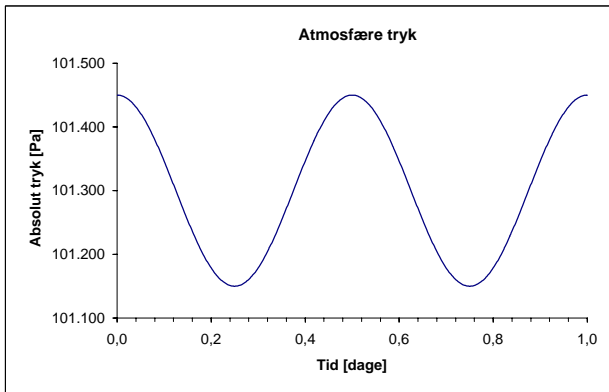
Lagdeling type D, medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

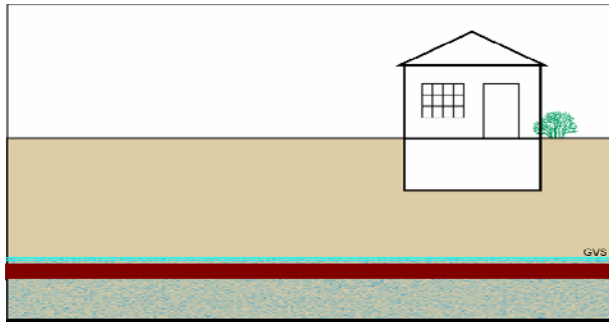
Transient atmosfære tryk
 Amplitude = 300 Pa, Periode = 12 timer

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: neutralt



Scenarium 4.5 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

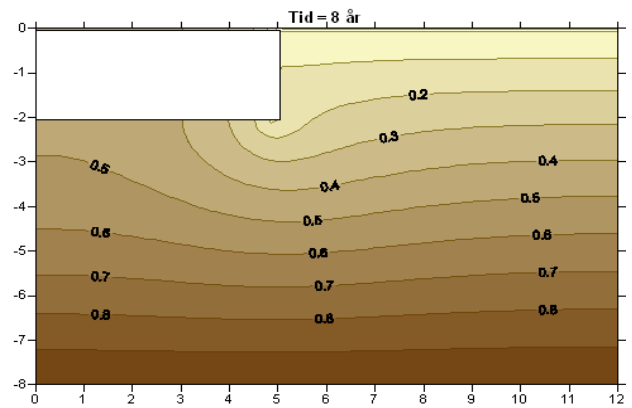
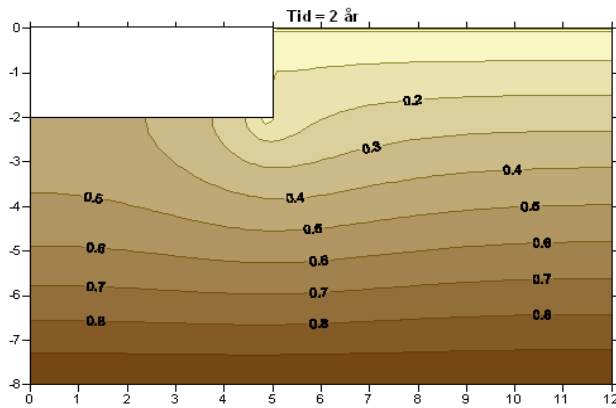
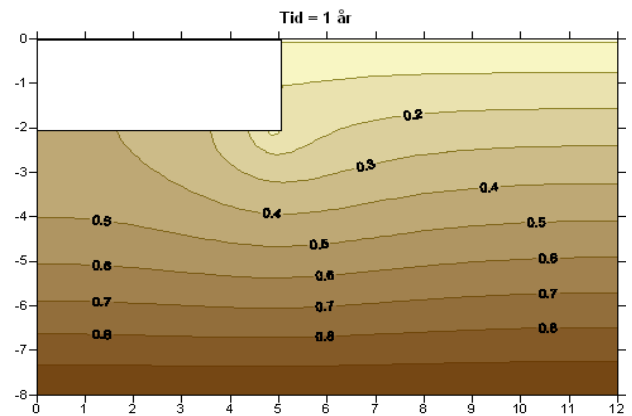
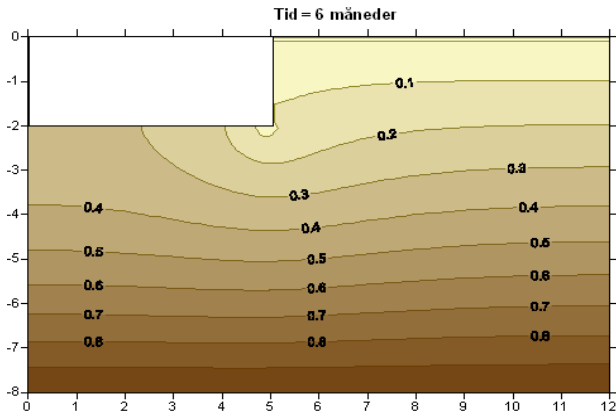
Homogen, Medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

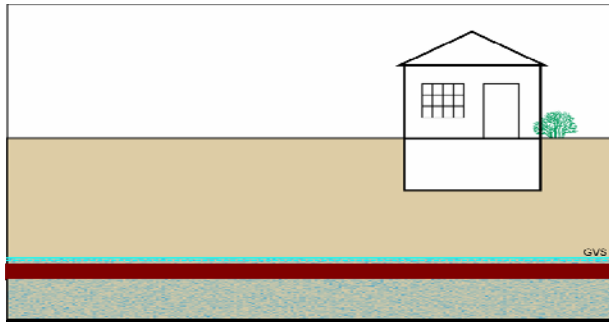
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 4.6 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

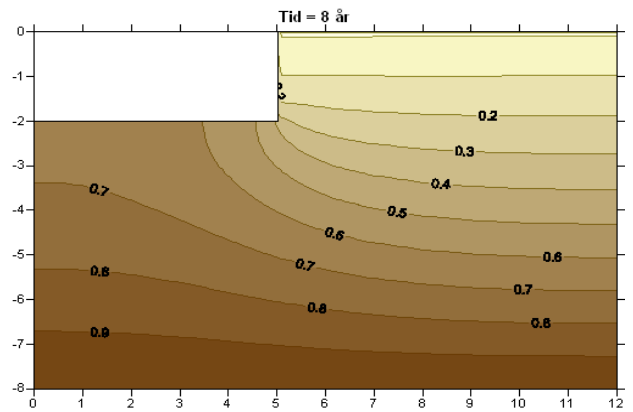
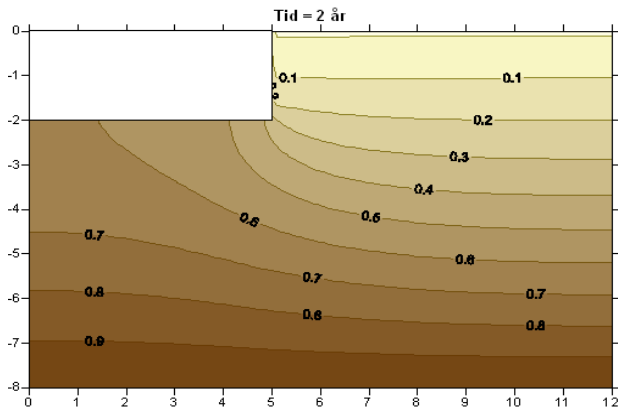
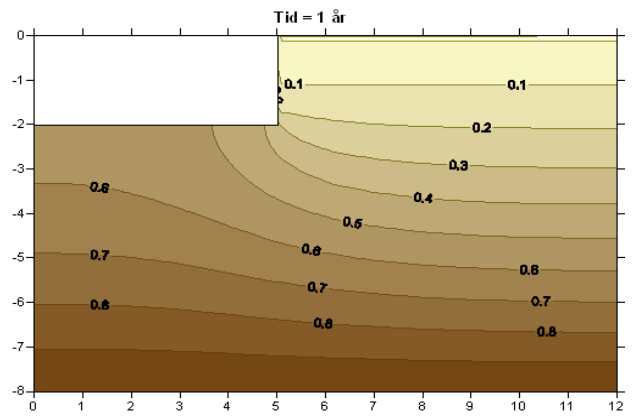
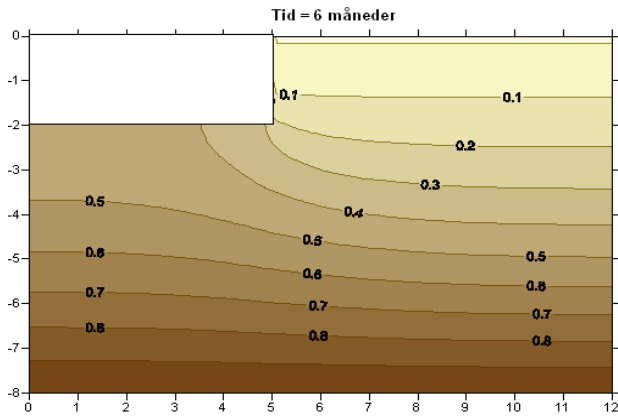
Homogen, Medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

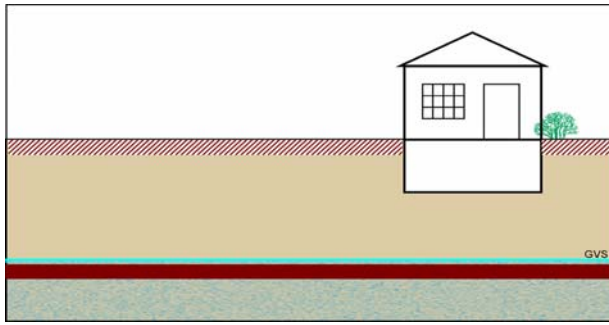
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Scenarium 4.7 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

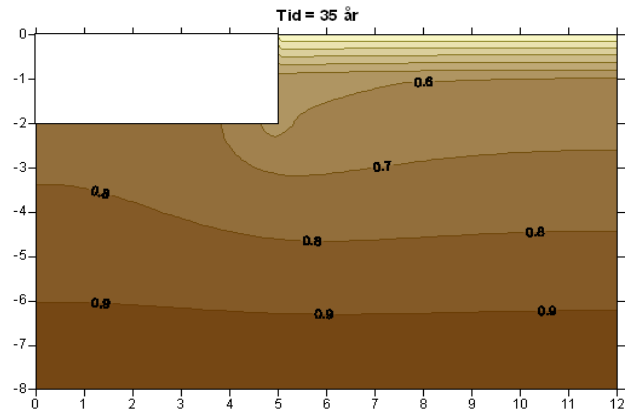
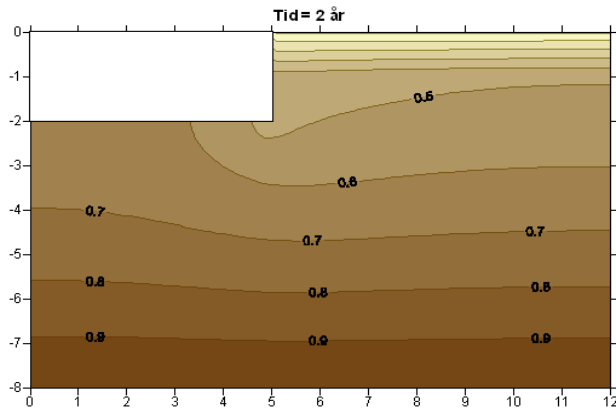
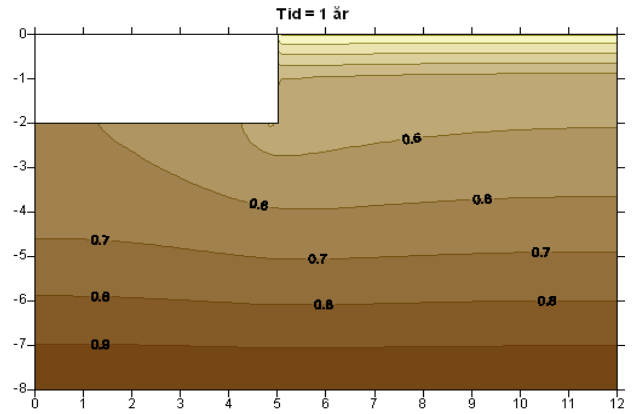
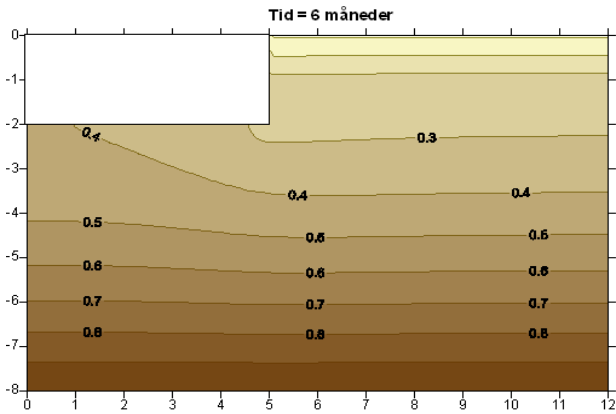
Lagdeling type A, medium sand
 $K_{s1}=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2}=1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

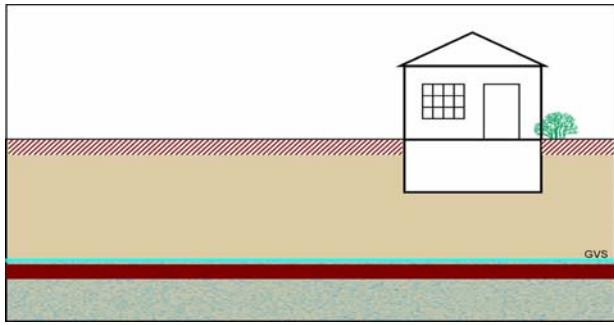
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi og center
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 4.8 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

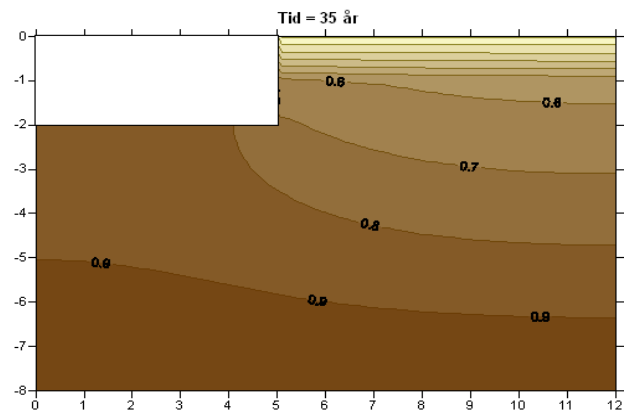
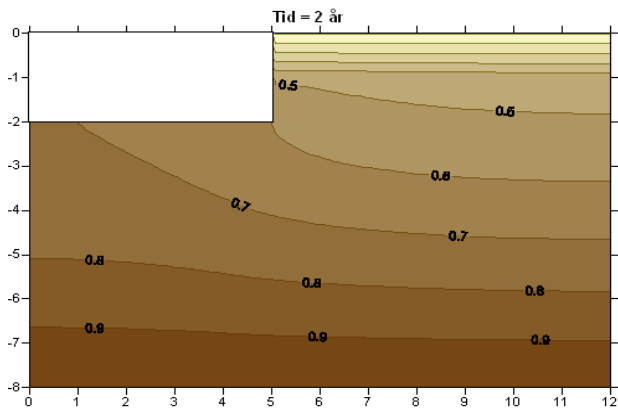
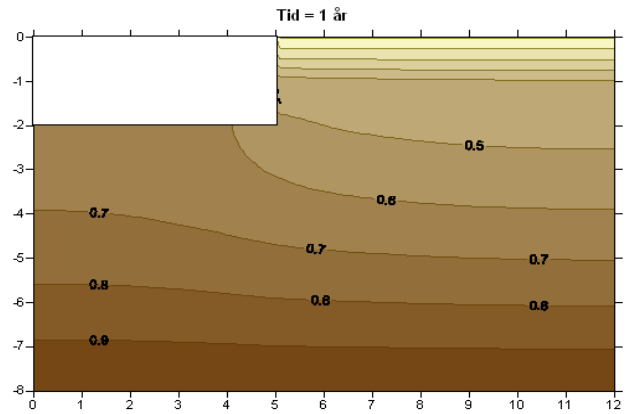
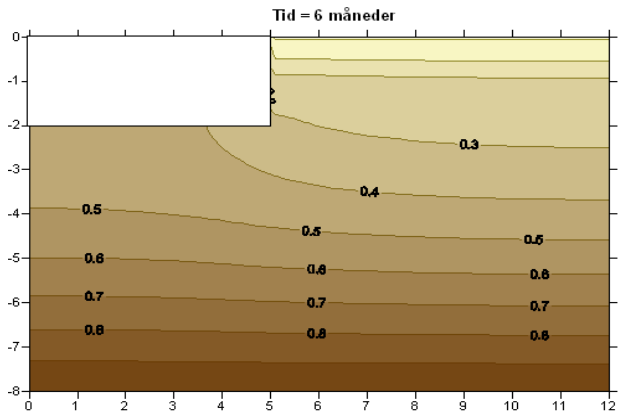
Lagdeling type A, medium sand
 $K_{s1} = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

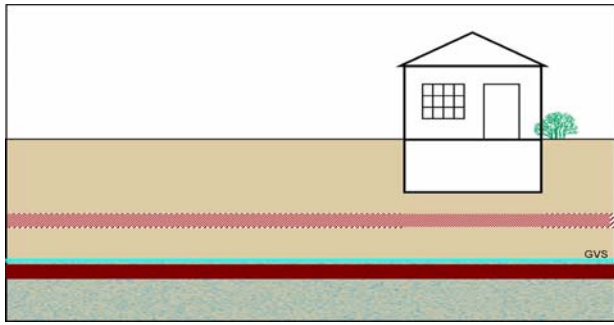
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi og center
 Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Scenarium 4.9 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

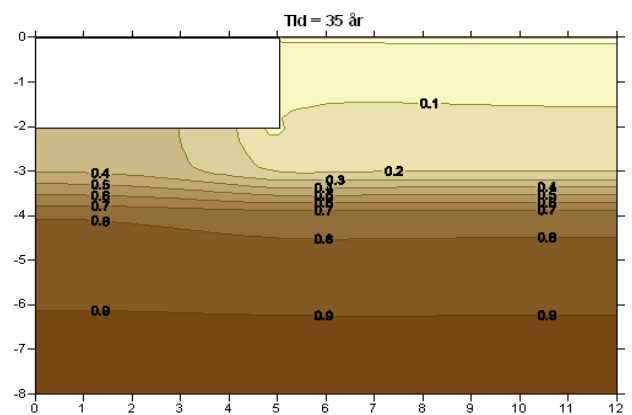
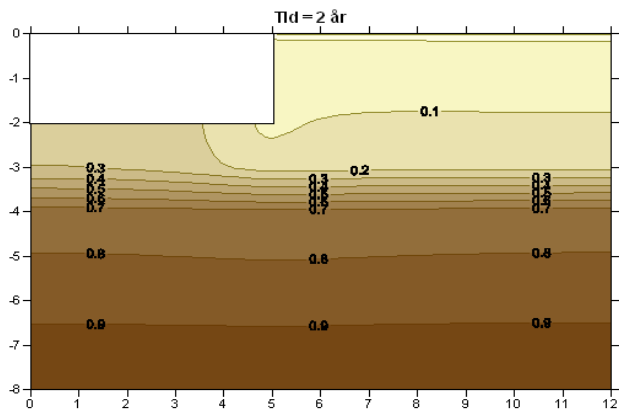
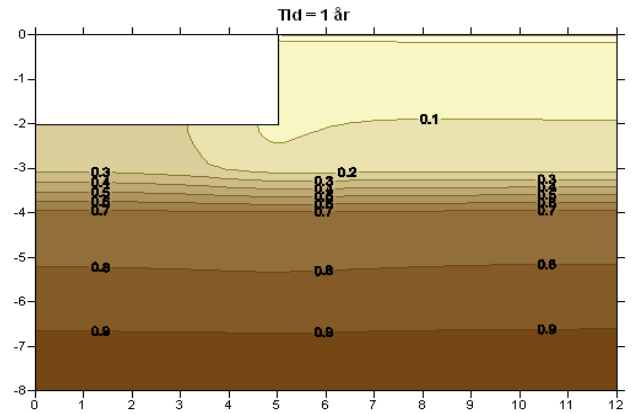
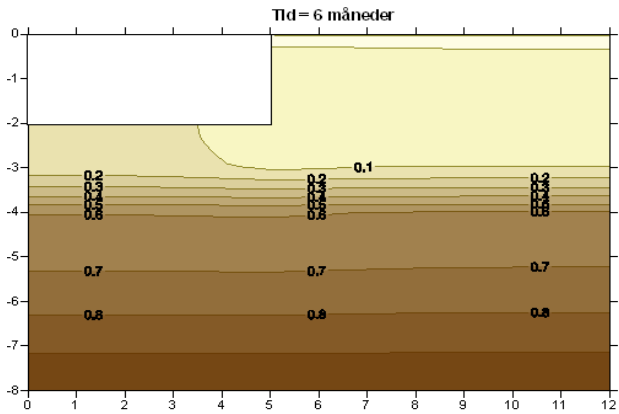
Lagdeling type B, medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

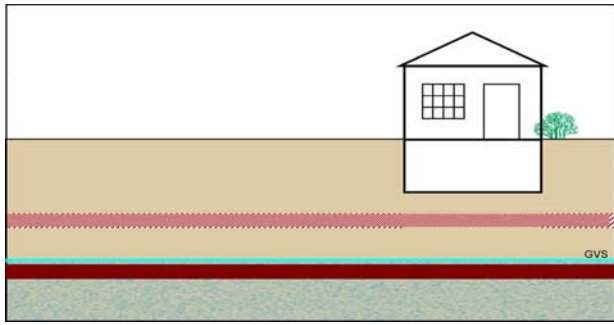
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 4.10 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

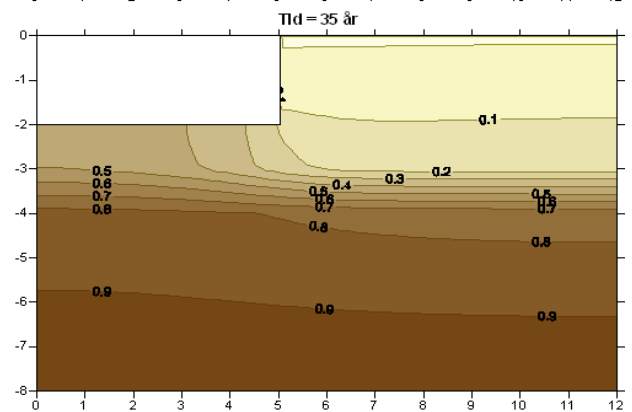
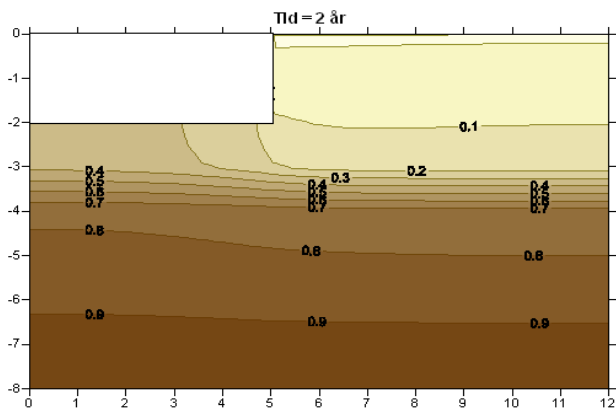
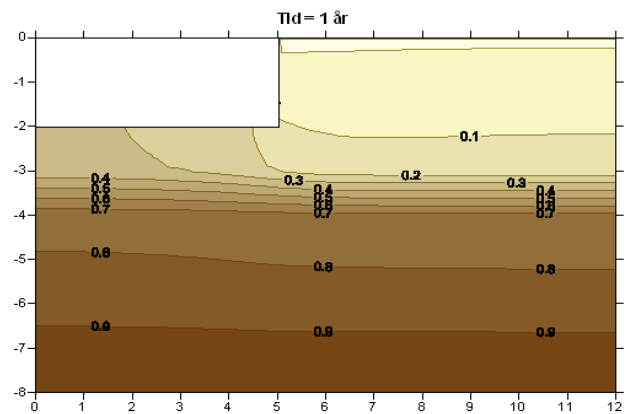
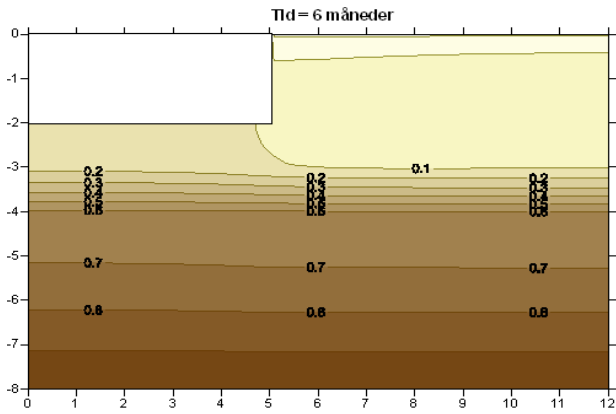
Lagdeling type B, medium sand
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g=1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

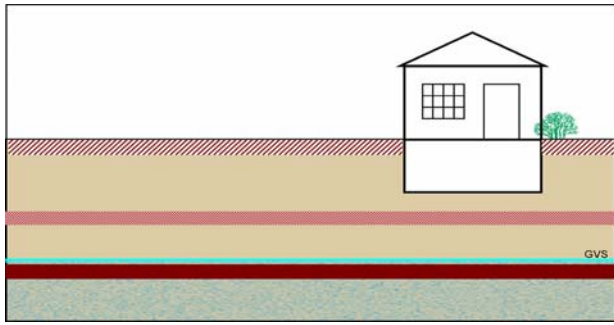
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi og center
 Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Scenarium 4.11 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

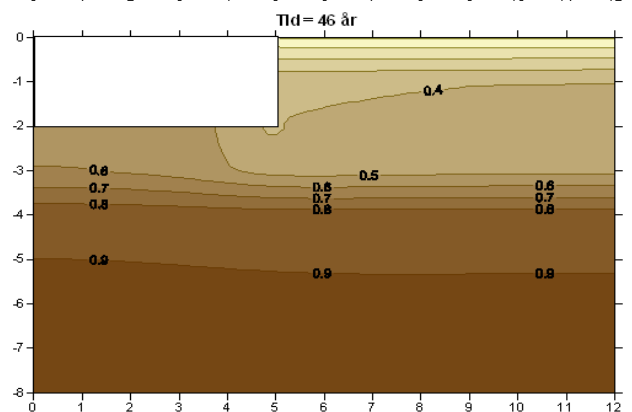
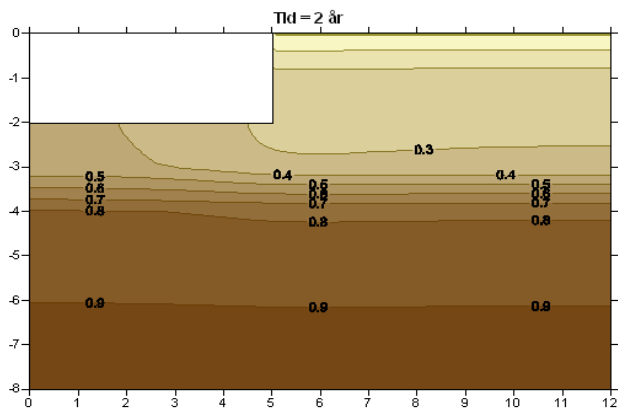
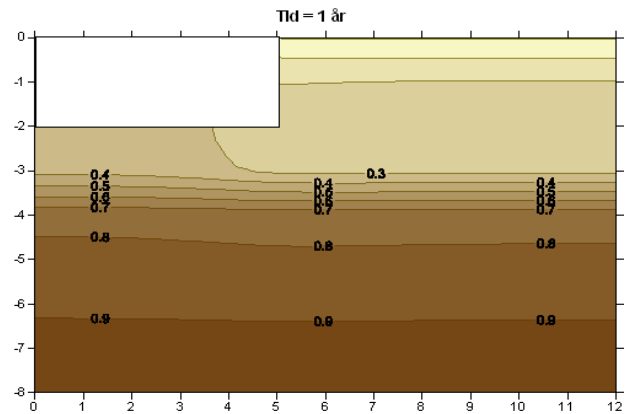
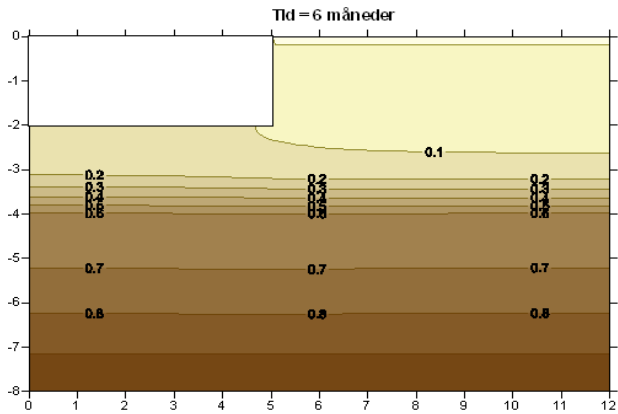
Lagdeling type C, medium sand
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g=1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

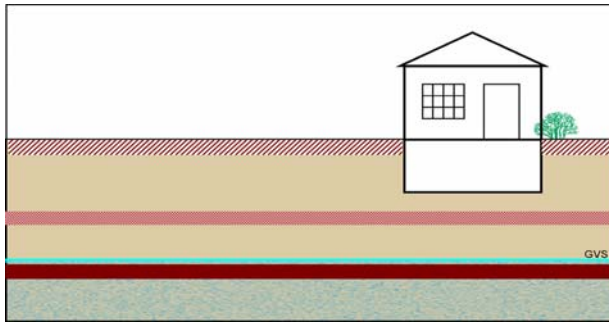
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 4.12 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

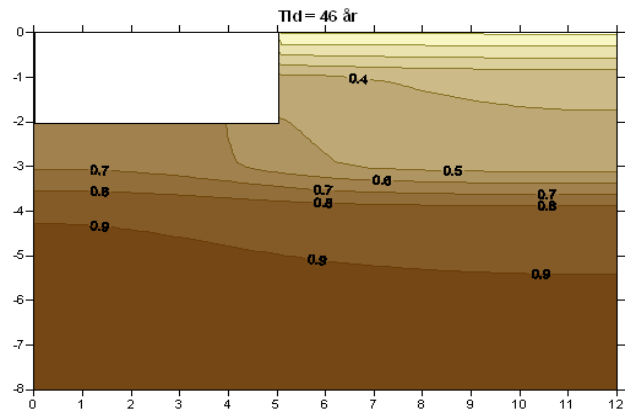
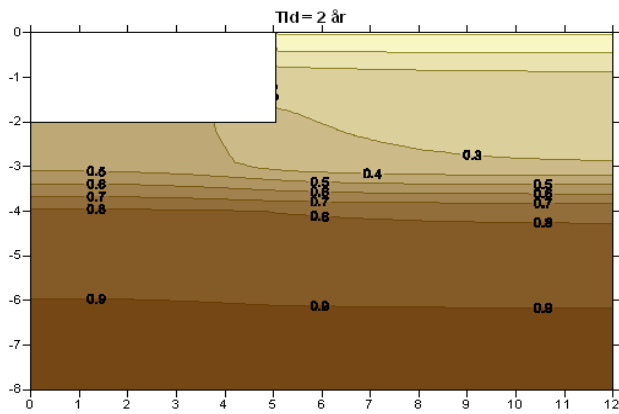
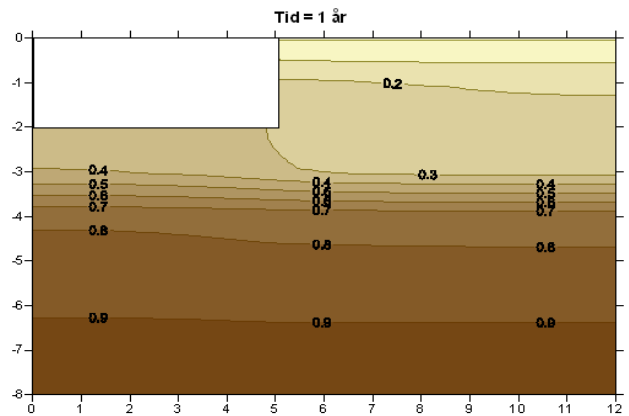
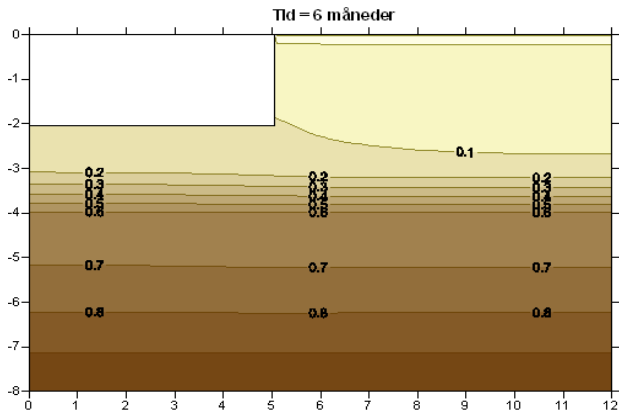
Lagdeling type C, medium sand
 $K_s = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

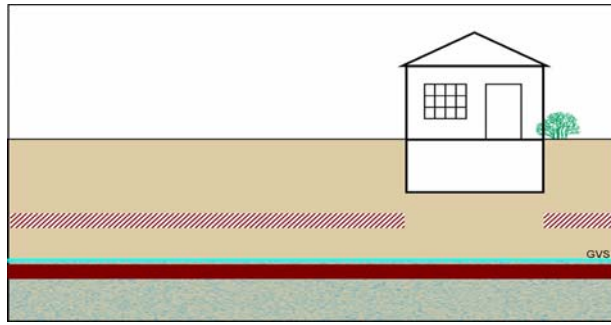
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Scenarium 4.13 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

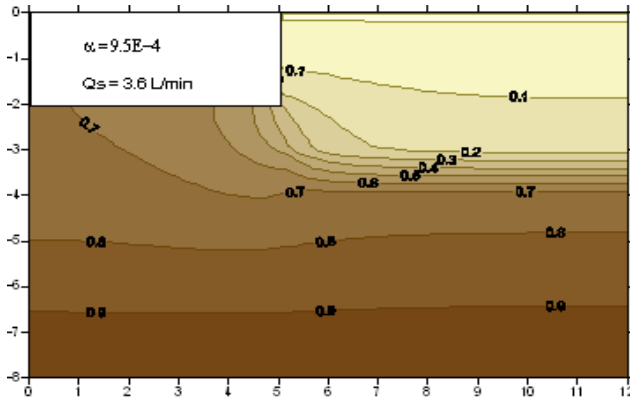
Lagdeling type D, medium sand
 $K_{s1} = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_{s2} = 1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

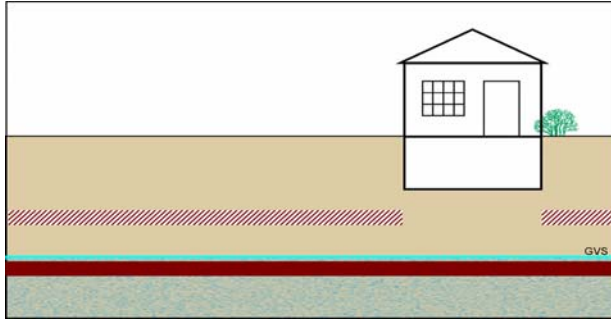
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi og center
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 4.14 - Geologisk lagdeling



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

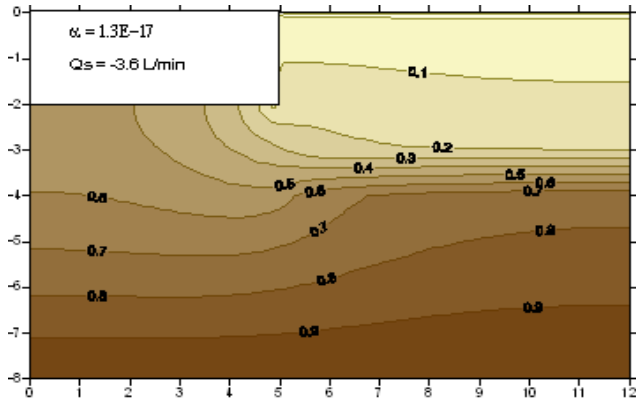
Lagdeling type D, medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 $K_g = 1E-13 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,21
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

Steady state

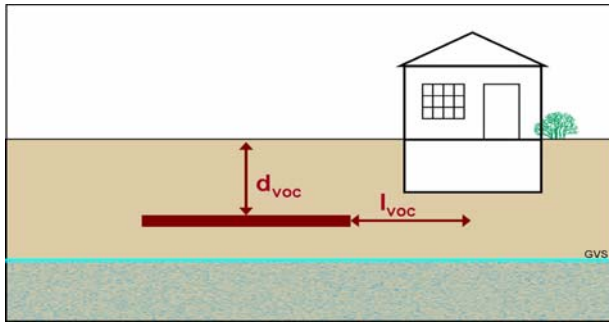
Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi og center
Indendørs tryk: 5 Pa overtryk



Bilag E

Scenarium 5.1 - Kilde placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1

Kilde 30x30 m

Kildeplacering: $d_{voc} = 3$ m; $l_{voc} = 10$ m

Geologiske og hydrogeologiske forhold

Homogen, medium sand

$K_s = 1E-11$ m², Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07

Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

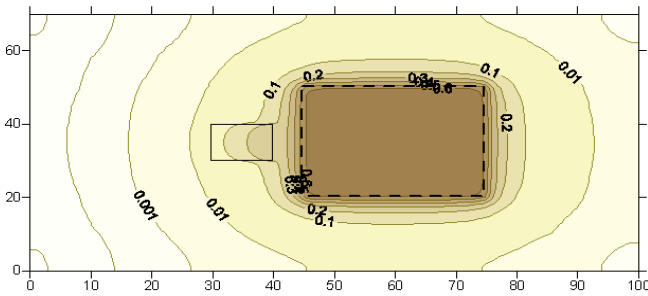
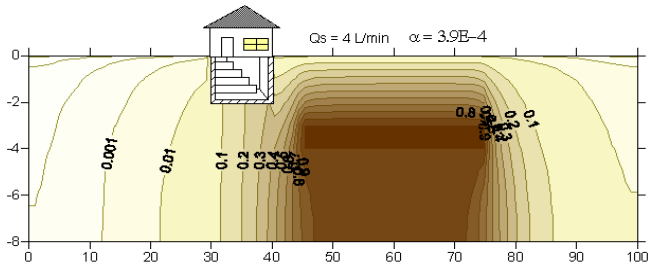
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

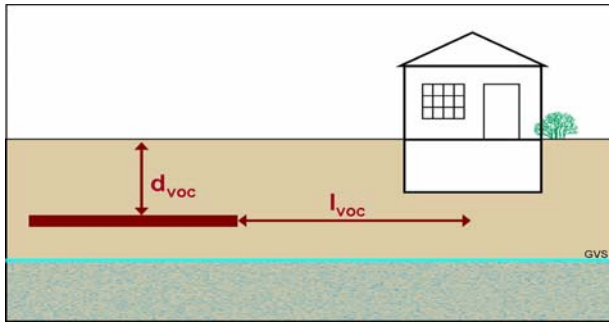
Bygning med kælder

Fundament: Sprække langs periferi

Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 5.2 - Kilde placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
 Kilde 30x30 m
 Kildeplacering: $d_{voc} = 3$ m; $l_{voc} = 25$ m

Geologiske og hydrogeologiske forhold

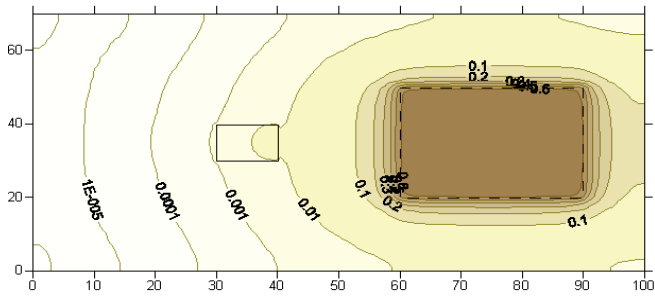
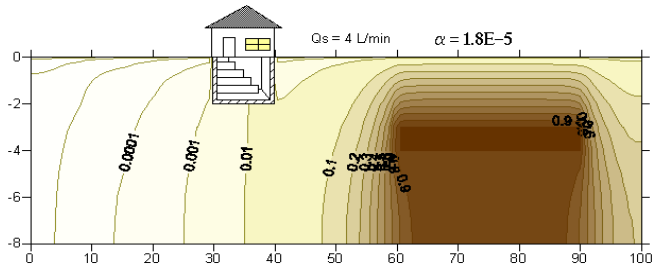
Homogen, medium sand
 $K_s = 1E-11$ m², Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

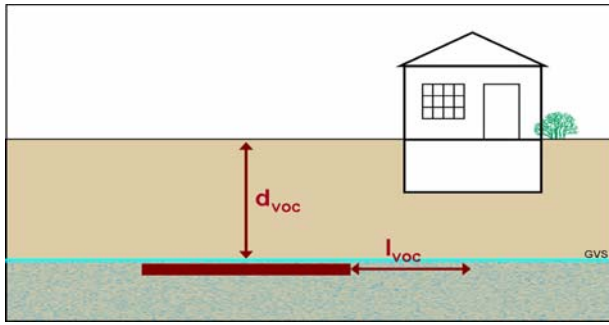
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 5.3 - Kilde placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
Kilde 30x30 m
Kildeplacering: $d_{voc} = 8$ m; $l_{voc} = 10$ m

Geologiske og hydrogeologiske forhold

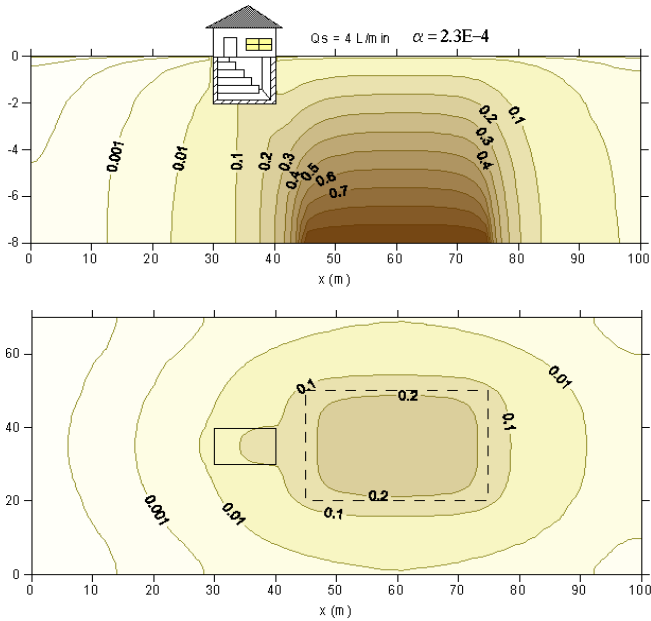
Homogen, medium sand
 $K_s = 1E-11$ m², Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

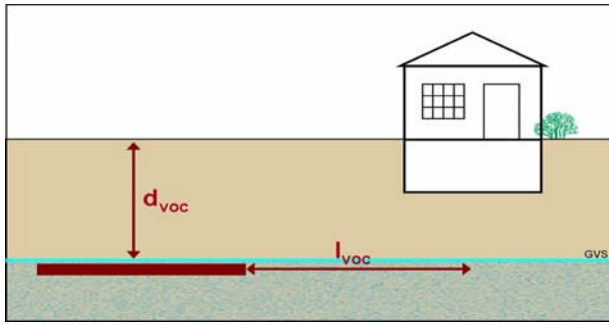
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
Fundament: Sprække langs periferi
Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 5.4 - Kilde placering



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1
 Kilde 30x30 m
 Kildeplacering: $d_{voc} = 8$ m; $l_{voc} = 25$ m

Geologiske og hydrogeologiske forhold

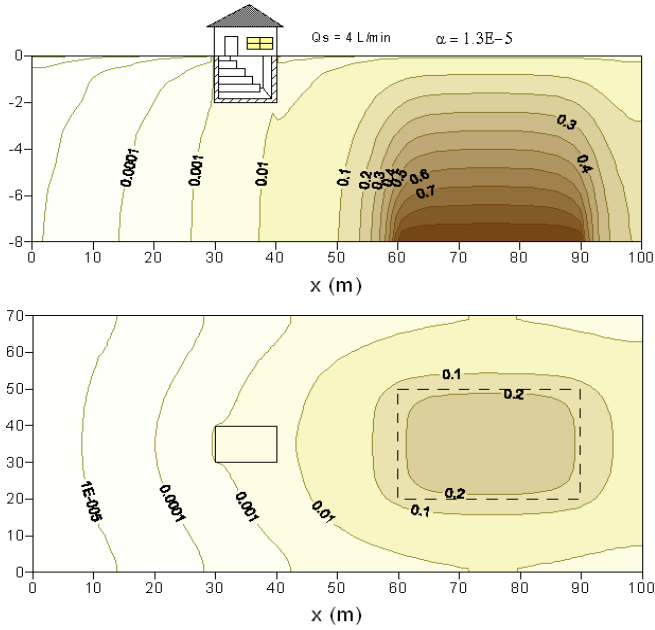
Homogen, medium sand
 $K_s = 1E-11$ m², Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

Steady-state

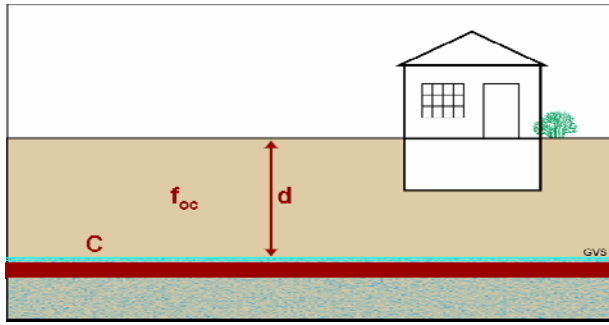
Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Bilag F

Scenarium 6.1 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke $1E6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke $1E6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

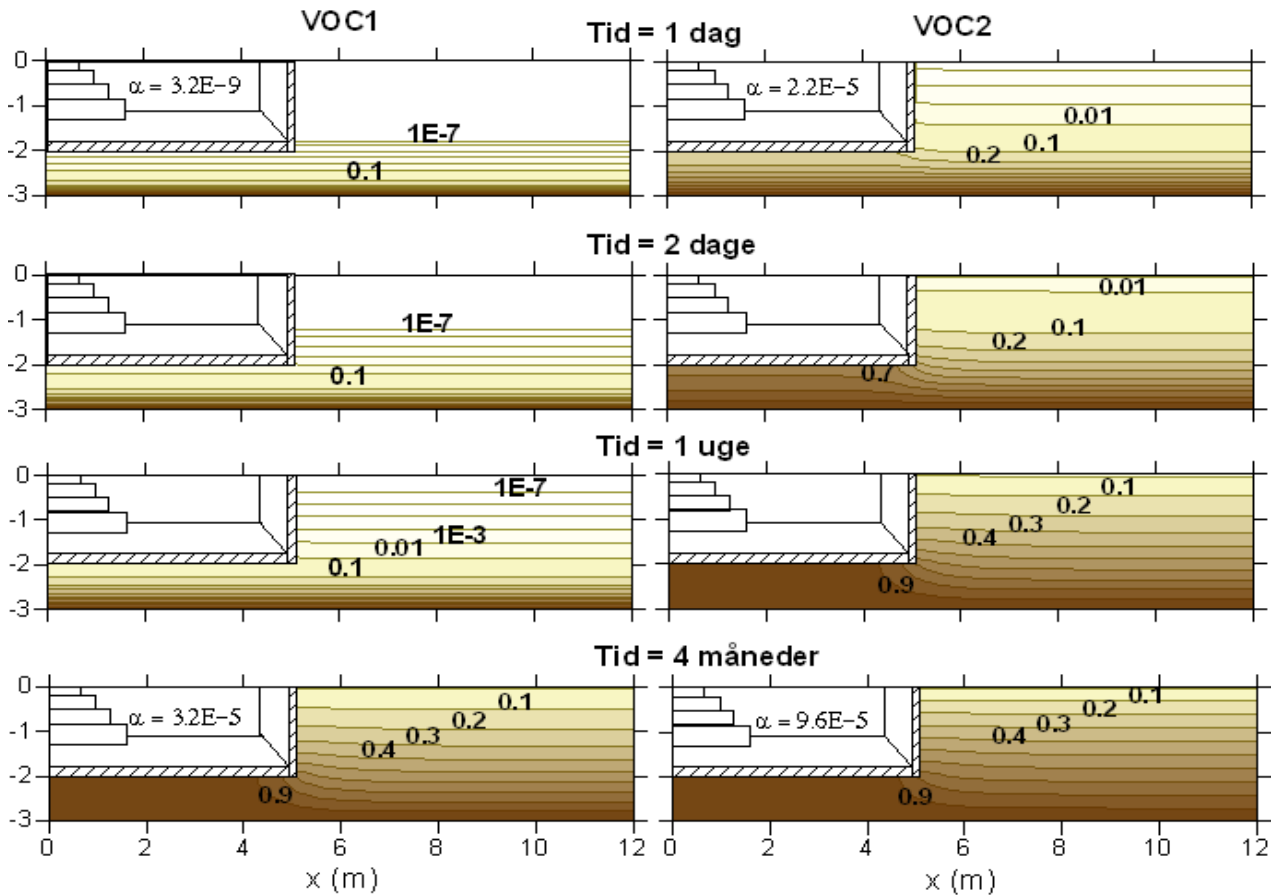
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,01$
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

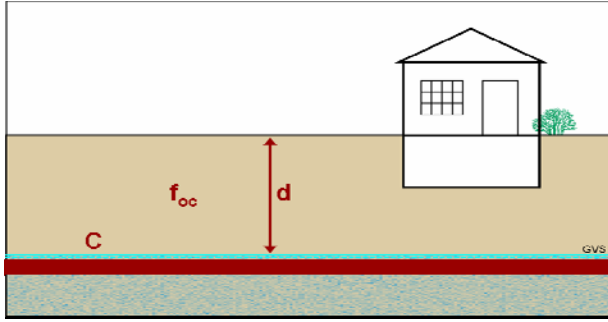
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.2 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke $1E6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke $1E6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

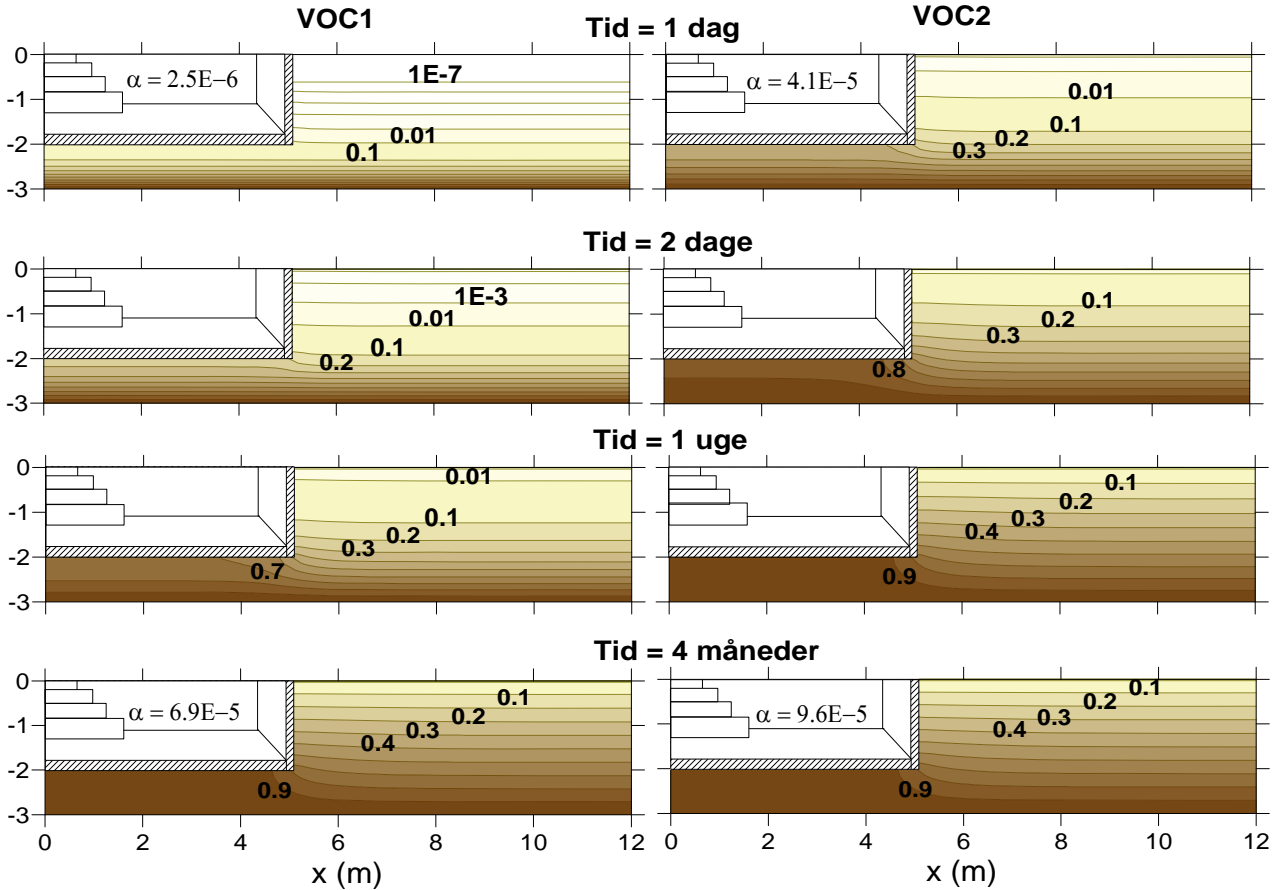
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,001$
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

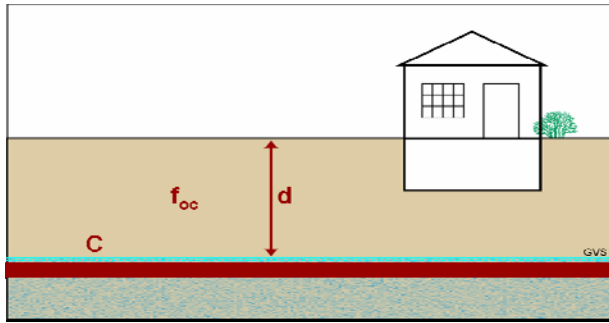
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.3 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

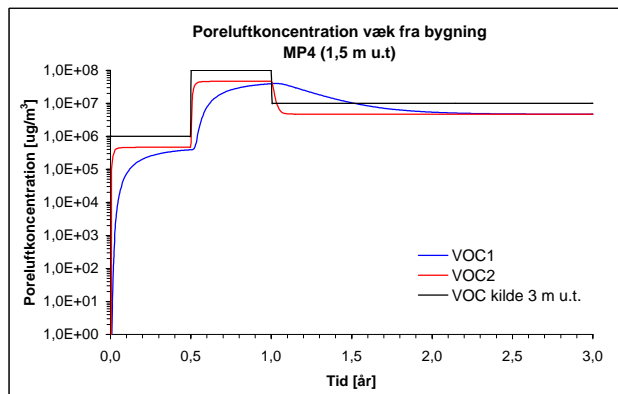
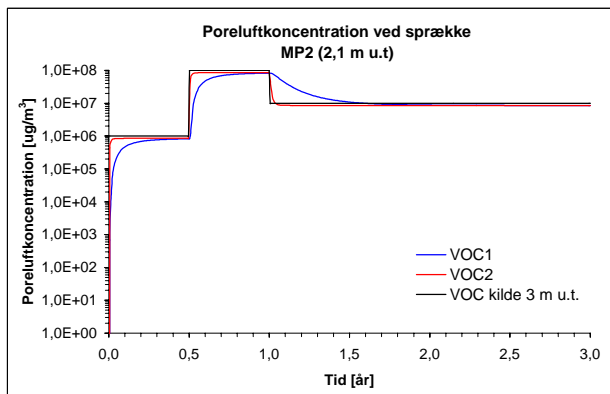
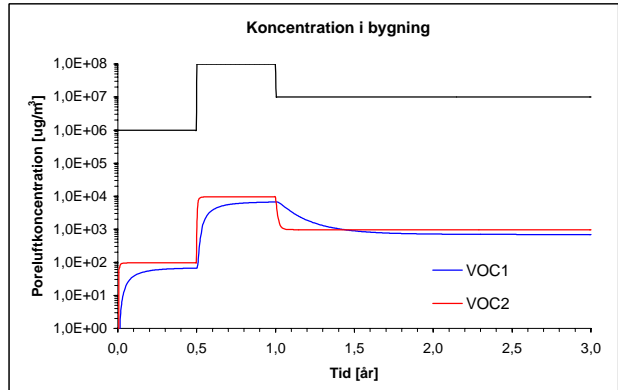
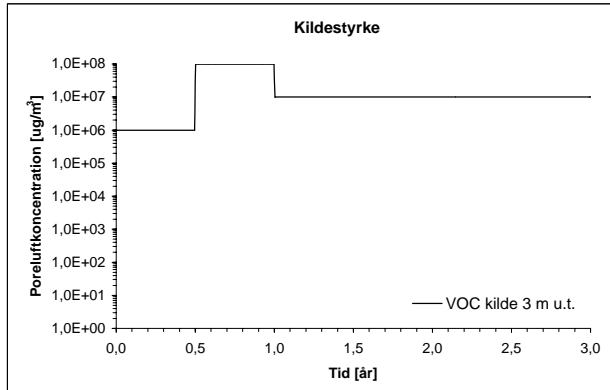
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,01$
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

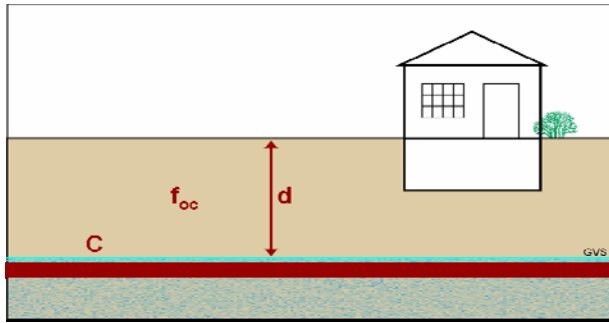
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.4 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

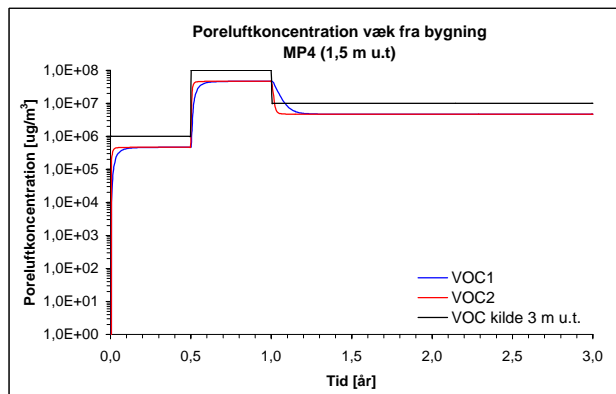
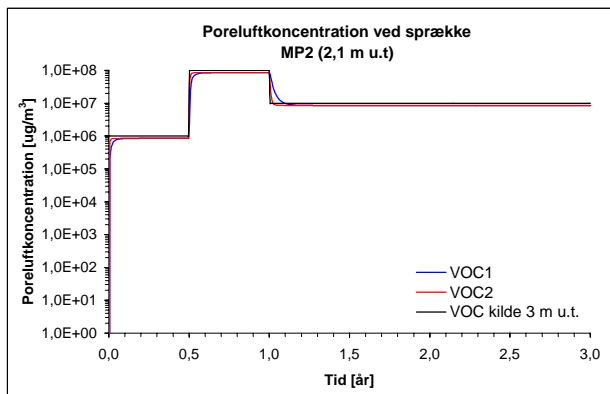
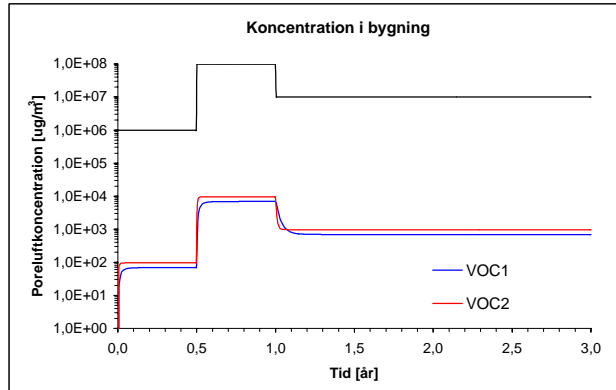
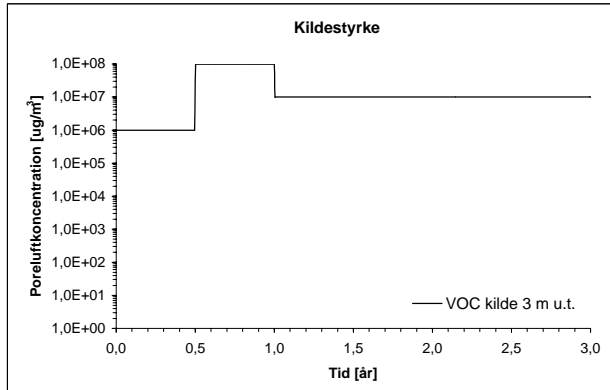
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,001$
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

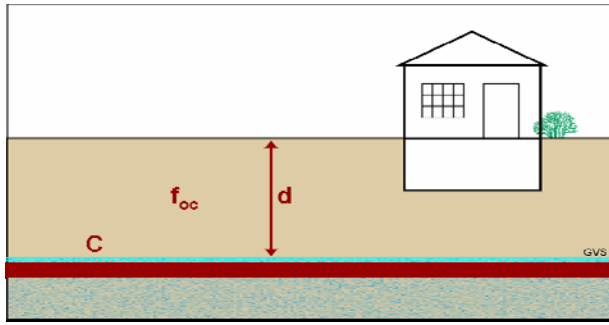
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.5 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke 1E6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke 1E6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

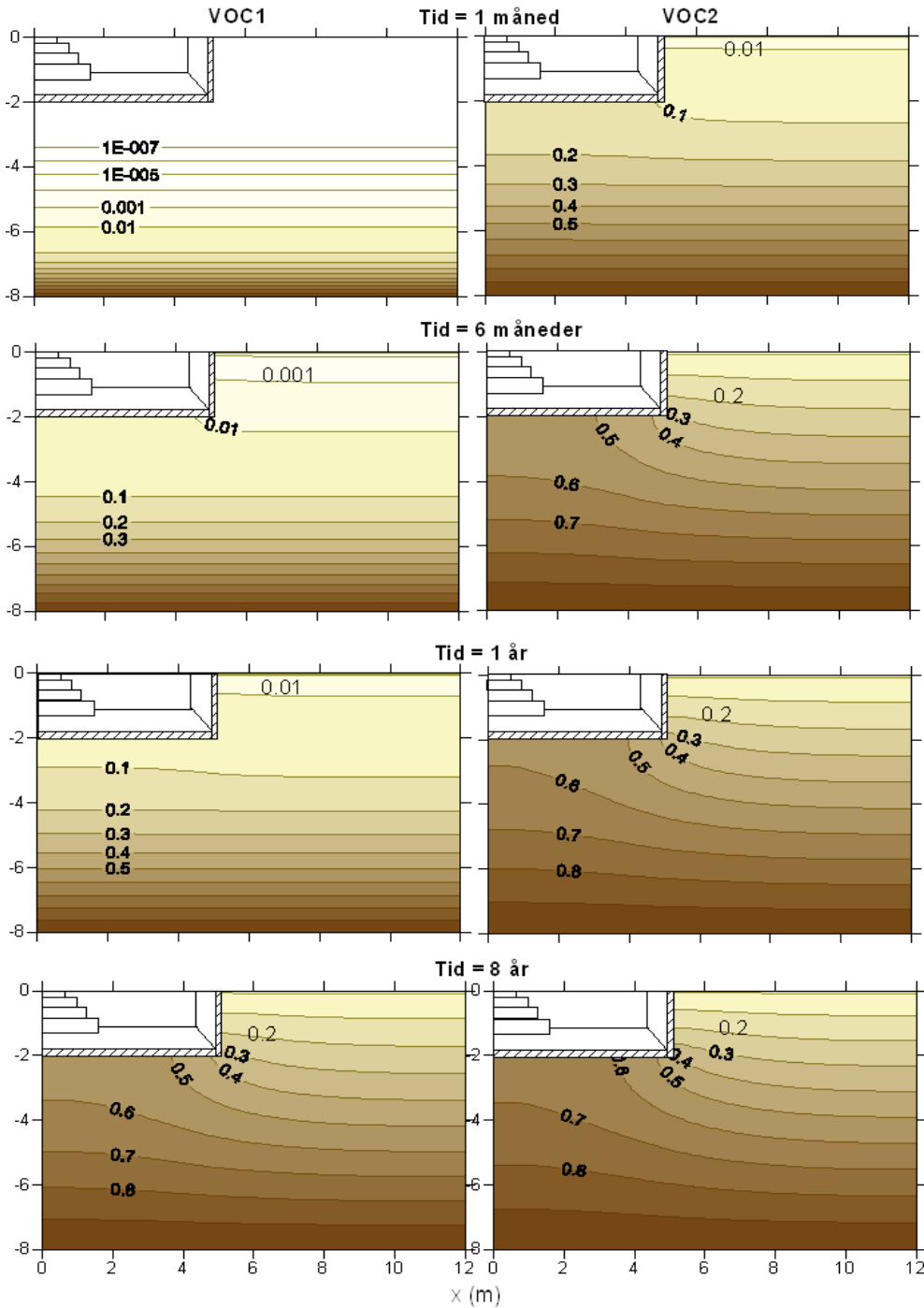
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,01$
 $K_s=1\text{E}-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

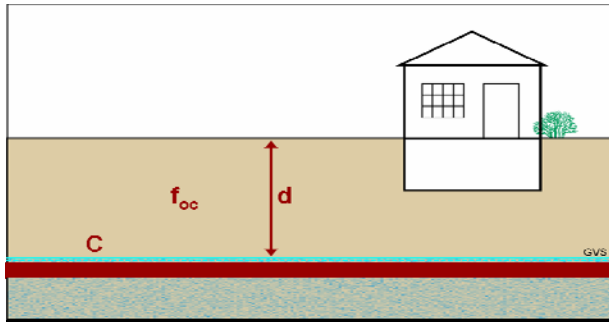
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.6 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke 1E6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke 1E6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

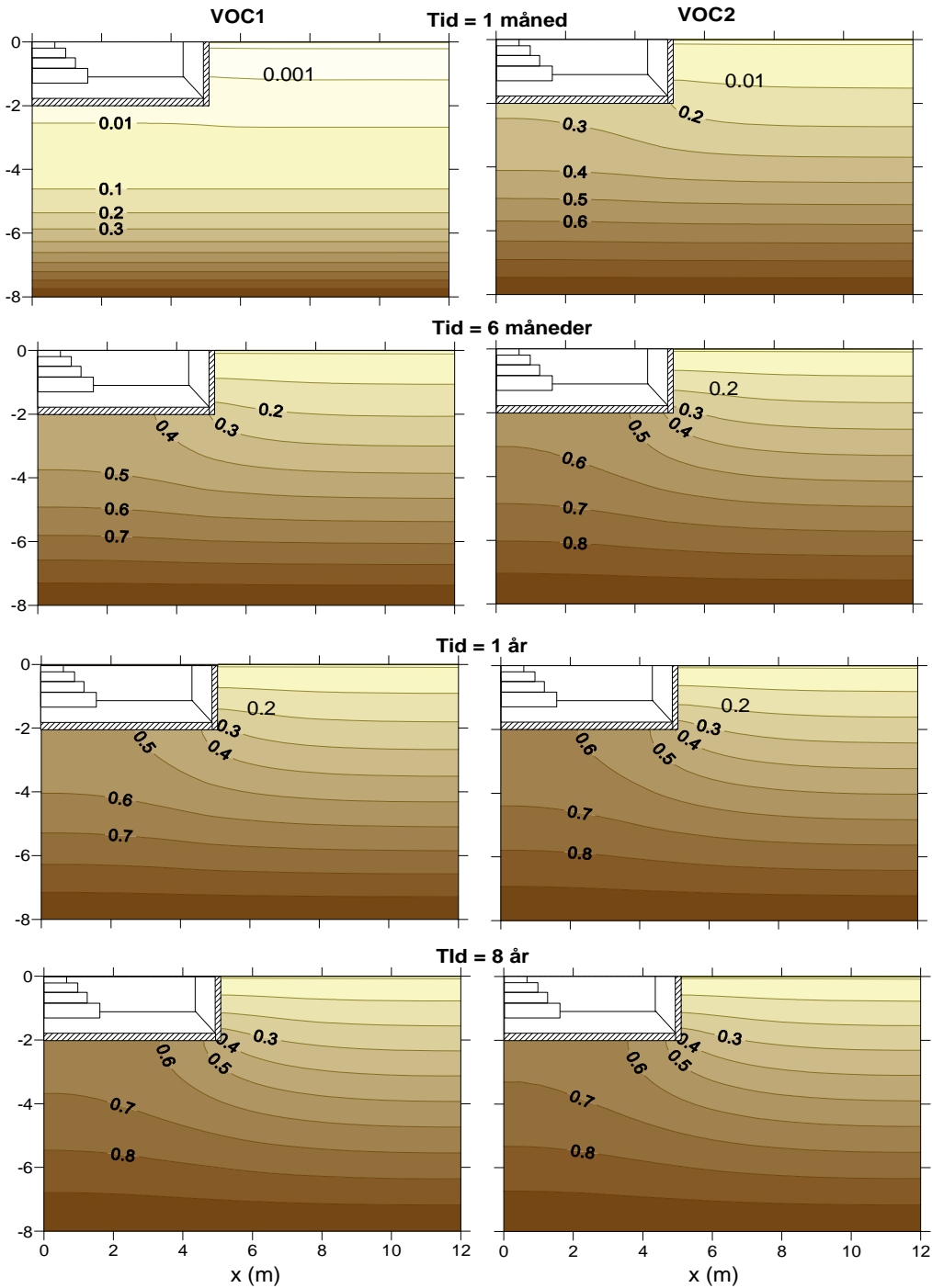
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,001$
 $K_s=1\text{E}-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

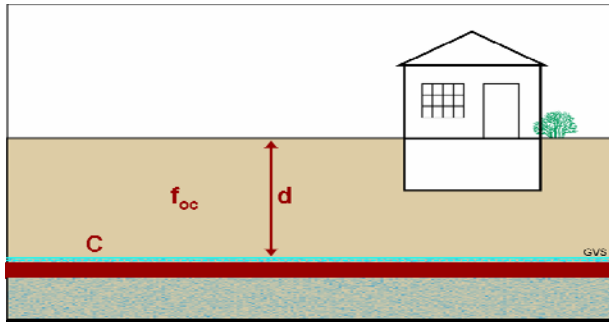
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.7 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke $1E6$ til $1E8$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke $1E6$ til $1E8$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

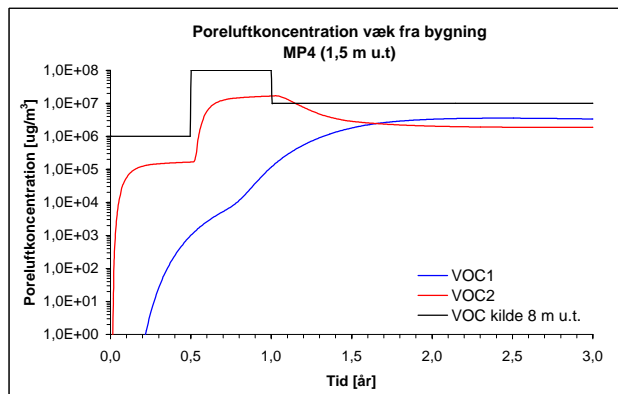
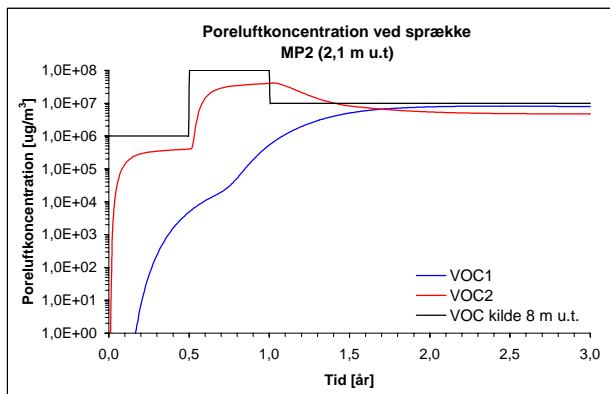
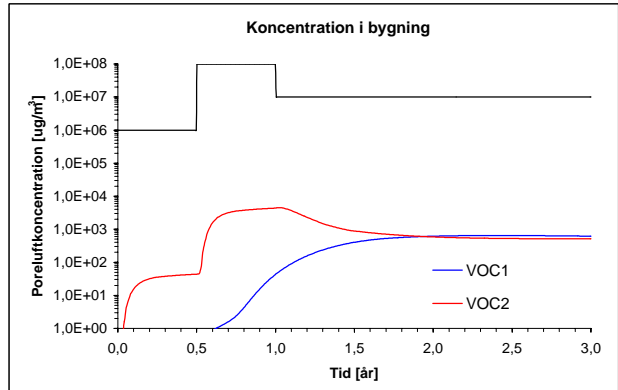
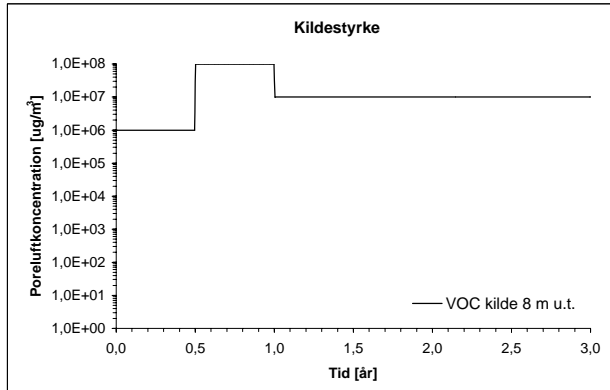
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,01$
 $K_s=1E-11$ m^2 , Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

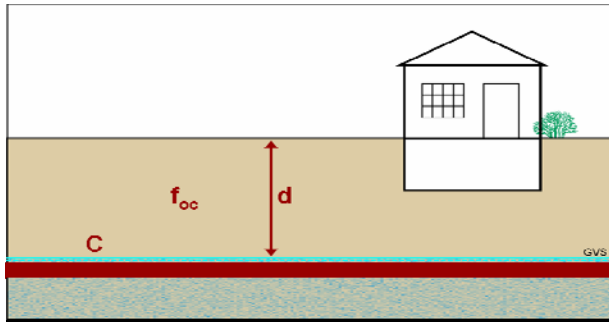
Steady state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Scenarium 6.8 - Kildestyrke



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC1, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Type = VOC2, kildestyrke 1E6 til 1E8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Kilde ved GVS

Geologiske og hydrogeologiske forhold

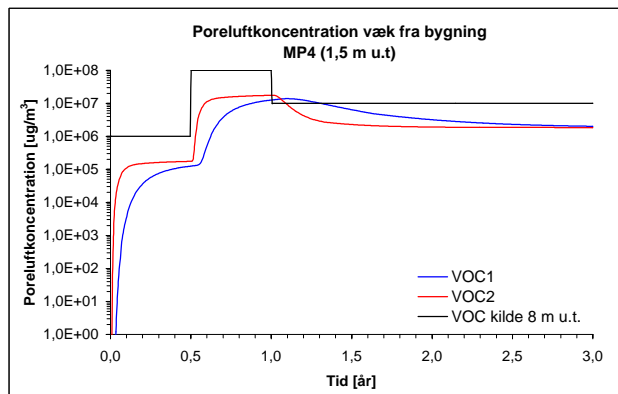
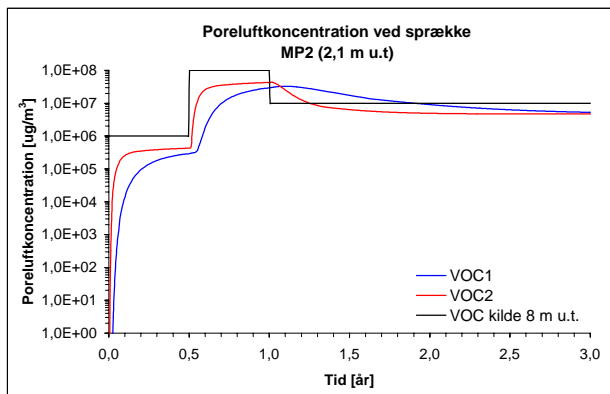
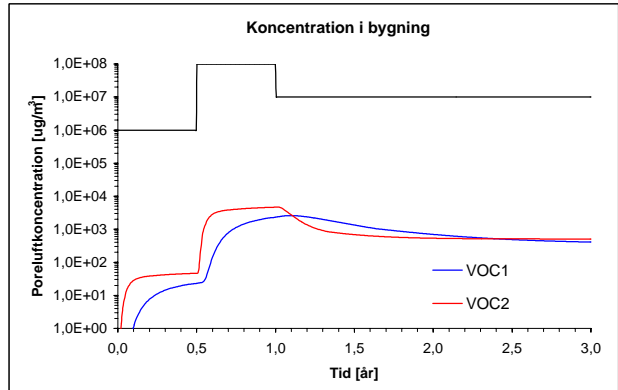
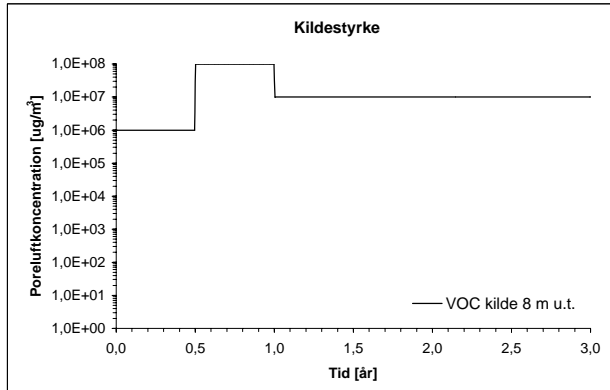
Homogen, Medium sand, $f_{oc}=0,001$
 $K_s=1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

Steady state

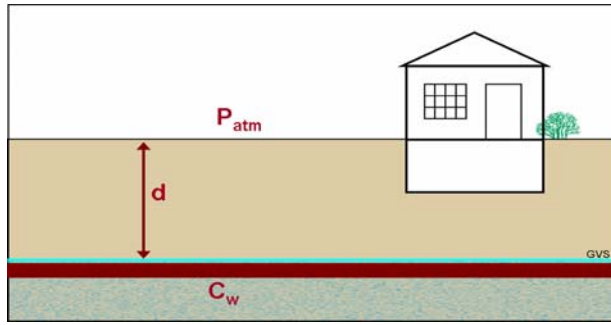
Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: Neutral



Bilag G

Scenarium 7.1 - Aerob nedbrydning



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC3
 Kilde ved GVS
 Kildestyrke: $C_w = 200 \text{ mg/l}$

Geologiske og hydrogeologiske forhold

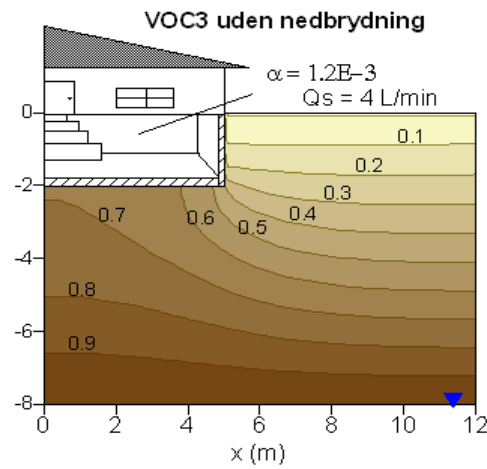
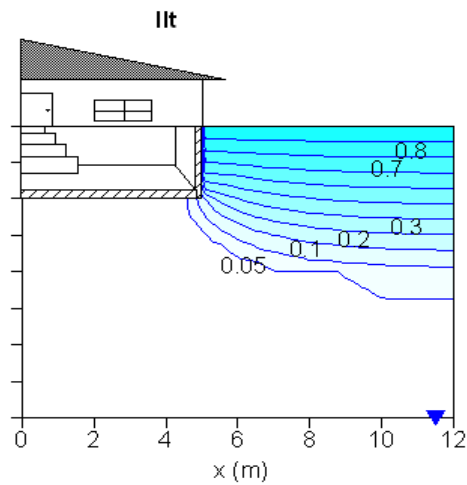
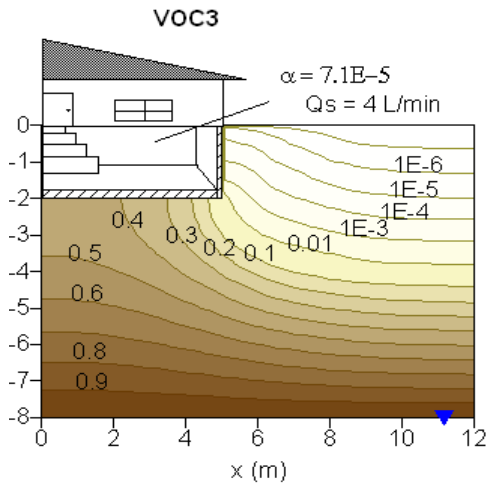
Homogen, Medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

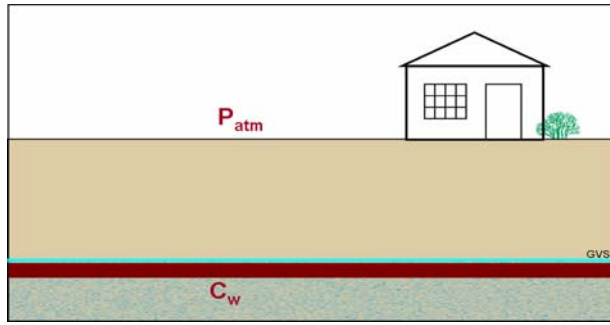
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 7.2 - Aerob nedbrydning



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC3
 Kilde ved GVS
 Kildestyrke: $C_w = 200 \text{ mg/l}$

Geologiske og hydrogeologiske forhold

Homogen, Medium sand
 $K_s = 1 \text{E-}11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

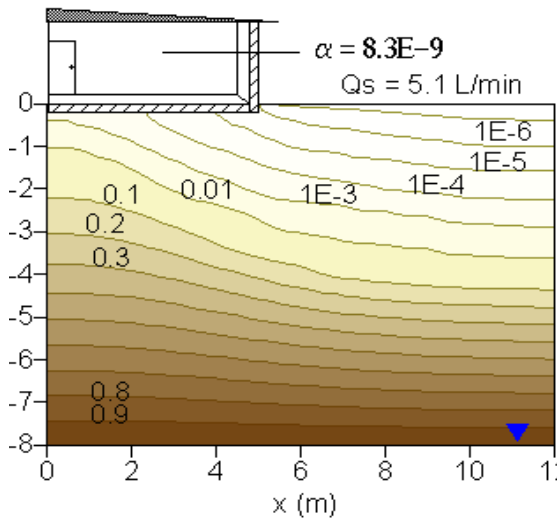
Meteorologiske forhold

Steady-state

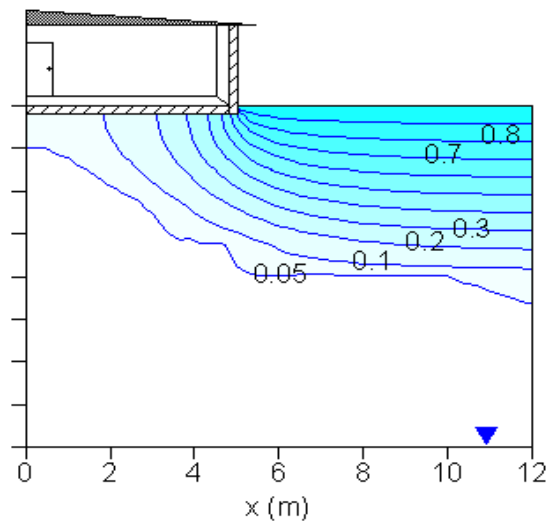
Bygningsmæssige forhold

Bygning uden kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk

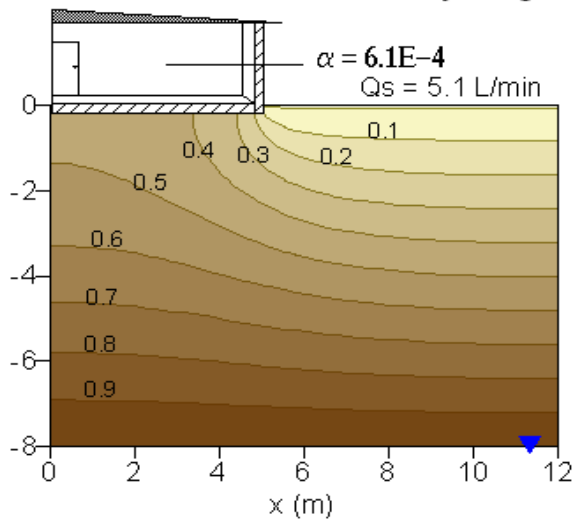
VOC3



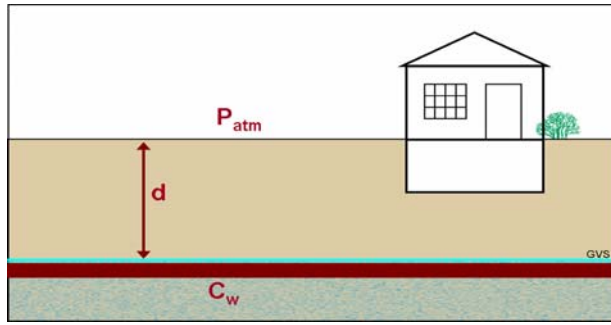
IIIt



VOC 3 uden nedbrydning



Scenarium 7.3 - Aerob nedbrydning



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC3
 Kilde ved GVS
 Kildestyrke: $C_w = 200 \text{ mg/l}$

Geologiske og hydrogeologiske forhold

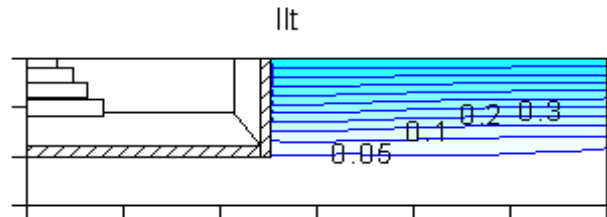
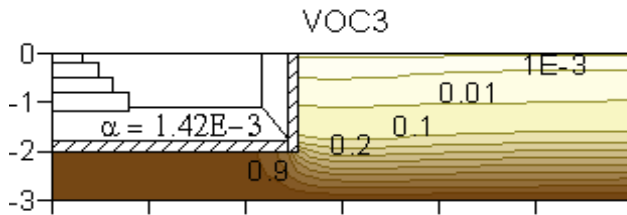
Homogen, Medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 3 m

Meteorologiske forhold

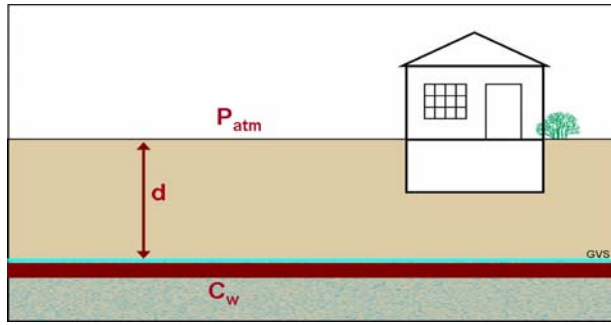
Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk



Scenarium 7.4 - Aerob nedbrydning



Forureningsmæssige forhold

Type = VOC3
 Kilde ved GVS
 Kildestyrke: $C_w = 20 \text{ mg/l}$

Geologiske og hydrogeologiske forhold

Homogen, Medium sand
 $K_s = 1E-11 \text{ m}^2$, Porøsitet = 0,35, Vandindhold = 0,07
 Dybde til GVS = 8 m

Meteorologiske forhold

Steady-state

Bygningsmæssige forhold

Bygning med kælder
 Fundament: Sprække langs periferi
 Indendørs tryk: 5 Pa undertryk

