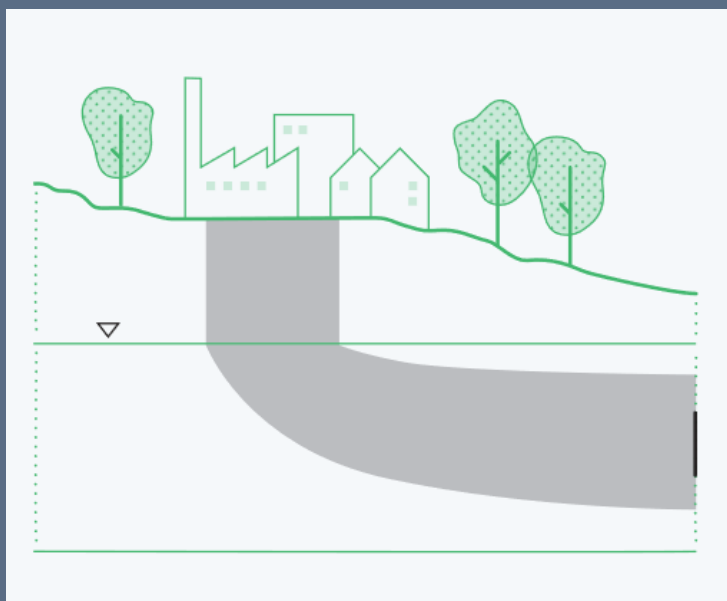




Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

GrundRisk Risikovurdering: Kursusmateriale



*Gitte Lemming Søndergaard, Catharina Simone Nisbeth
Madsen og Nanna Isbak Thomsen*



Forord

Dette kursusmateriale til GrundRisk Risikovurdering er tiltænkt anvendelse både som selvstudium og til undervisningsbrug.

Der er som udgangspunkt sigtet efter, at de enkelte slides skal være selvforklarende, således at de kan anvendes til selvstudium. Ved brug for undervisning kan indholdet tilpasses og tekstmængden reduceres efter behov.

For den praktiske anvendelse af GrundRisk Risikovurdering (online beregningsværktøj) henvises til den udarbejdede *Guide til at komme i gang med GrundRisk Risikovurdering*.



Overordnet indholdsfortegnelse

- Kapitel 1 [Generel introduktion til GrundRisk Risikovurdering](#)
- Kapitel 2 [GrundRisk – Opbygning, datakilder og informationsflow](#)
- Kapitel 3 [Grundlæggende principper i den horisontale stoftransportmodel](#)

- I kapitel 4 til 8 gennemgås de fem vertikale modeller
- Kapitel 4 [Model 1. Homogen vandmættet ler](#)
- Kapitel 5 [Model 2. Vandmættet opsprækket ler](#)
- Kapitel 6 [Model 3. Umættet sand](#)
- Kapitel 7 [Model 4. Umættet zone med impermeabelt dæklag](#)
- Kapitel 8 [Model 5. Forureningskilde beliggende lige over grundvandet](#)

- Kapitel 9 [Valg af model](#)
- Kapitel 10 [Koblingen af de vertikale modeller med den horisontale model](#)
- Kapitel 11 [Usikkerhedsvurdering af resultater i GrundRisk Risikovurderingen](#)
- Kapitel 12 [Parameterliste: Alfabetisk gennemgang af parametre og inputs](#)
- Kapitel 13 [Referenceliste](#)



Detaljeret indholdsfortegnelse

Kapitel 1 [Generel introduktion til GrundRisk Risikovurdering](#)

[1.1 Formål med GrundRisk Risikovurdering](#)

[1.2 Beregningsresultater med GrundRisk Risikovurdering](#)

[1.3 Overordnede forudsætninger og antagelser i GrundRisk](#)

[1.4 Hvilke forureningsstoffer kan GrundRisk håndtere?](#)

[1.5 Hvordan håndteres kulbrinter i GrundRisk?](#)

Kapitel 2 [GrundRisk – Opbygning, datakilder og informationsflow](#)

[2.1 Hvordan kommer lokaliteter ind i GrundRisk screening og risikovurdering?](#)

[2.2 Hvornår anvendes den foreløbige risikovurdering](#)

[2.3 Oversigt over informationsflow fra Jupiter og DK modellen til GrundRisk](#)

[2.4 GEUS beregneren – Estimat af lertykkelse](#)

[2.5 Data fra Den Nationale Vandressource Model \(DK modellen\)](#)

[2.6 Data som kan overføres fra GrundRisk Screening til GrundRisk Risikovurdering](#)

Kapitel 3 [Grundlæggende principper i den horisontale stoftransportmodel](#)

[3.1 Inkluderede processer i den horisontale stoftransportmodel \(grundvandstransporten\)](#)

[3.2 Parametre til forureningskilde](#)

[3.3 Regneopgaver med tilhørende løsninger](#)



Detaljeret indholdsfortegnelse (links til kapitler indsættes)

Kapitel 4 [Model 1. Homogen vandmættet ler](#)

[Model 1: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport](#)

[Model 1: Parametre til den horisontale transport](#)

[Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler](#)

[Case 1: Regneopgave med tilhørende løsning](#)

Kapitel 5 [Model 2. Vandmættet opsprækket ler](#)

[Model 2 Parametre til forureningskilde og den vertikale transport](#)

[Model 2 Parametre til den horisontale transport](#)

[Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler](#)

[Case 2: Regneopgave med tilhørende løsning](#)

Kapitel 6 [Model 3. Umættet sand](#)

[Model 3: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport](#)

[Model 3: Parametre til den horisontale transport](#)

[Case 3: BTEX-forurening i umættet sand](#)

[Case 3: Regneopgave med tilhørende løsninger](#)



Detaljeret indholdsfortegnelse (links til kapitler indsættes)

Kapitel 7 [Model 4. Umættet zone med impermeabelt dæklag](#)

[Model 4: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport](#)

[Model 4: Parametre til den horisontale transport](#)

[Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag](#)

[Case 4: Parameterforståelse](#)

Kapitel 8 [Model 5. Forureningskilde beliggende lige over grundvandet](#)

[Model 5: Parametre til forureningskilde og den horisontale transport](#)

[Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet](#)

[Case 5: Parameterforståelse](#)

Kapitel 9 [Valg af model](#)

Kapitel 10 [Koblingen af de vertikale modeller med den horisontale model](#)

[Den horisontale stoftransportmodel og kobling til de vertikale modeller \(Model 1, 2 og 5\)](#)

[Den horisontale stoftransportmodel og kobling til de vertikale modeller \(Model 3 og 4\)](#)

[Opmærksomhedspunkt vedr. vandbalancen](#)



Detaljeret indholdsfortegnelse (links til kapitler indsættes)

Kapitel 11 [Usikkerhedsvurdering af resultater i GrundRisk Risikovurderingen](#)

[Konceptuel usikkerhed i GrundRisk Risikovurdering](#)

[Parameterusikkerhed i GrundRisk Risikovurdering](#)

Kapitel 12 [Parameterliste: Alfabetisk gennemgang af parametre og inputs](#)

[Alfabetisk parameterliste](#)

[Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse](#)

Kapitel 13 [Referenceliste](#)



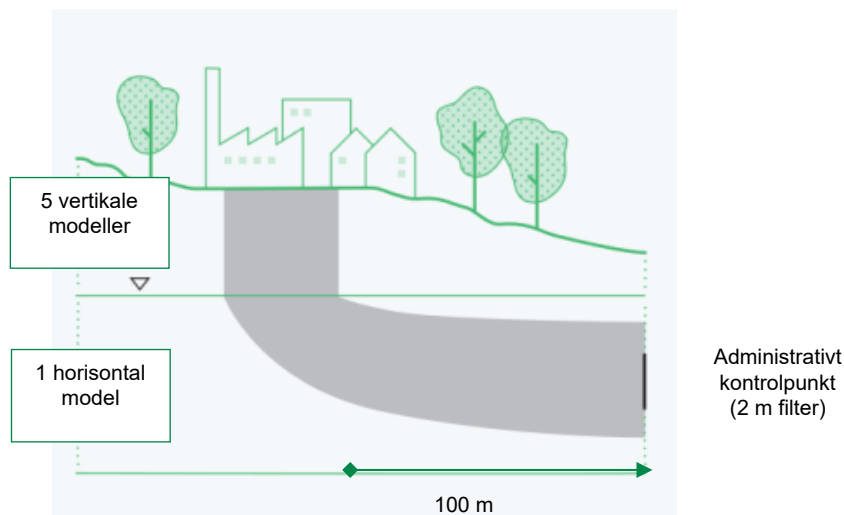
Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Generel introduktion til GrundRisk Risikovurdering

Kapitel 1

1.1 Formål med GrundRisk risikovurdering

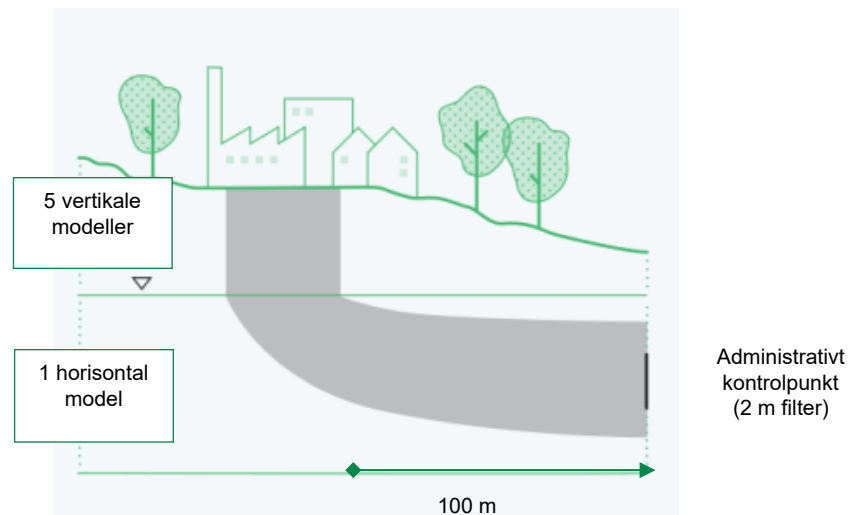
1. At vurdere en punktkildes påvirkning af det førstkommende betydende grundvandsmagasin som udgangspunkt 100 meter nedstrøms for en forurenet lokalitet
2. At vurdere en punktkildes påvirkning af en indvindingsboring placeret nedstrøms lokaliteten



Formål med GrundRisk risikovurdering

Koncentration i nedstrøms kontrolpunkt

- Der foretages altid beregninger for et administrativt kontrolpunkt 100 m nedstrøms fra punktkilden.
- Koncentrationen i kontrolpunktet beregnes som en midlet koncentration over et 2 m filter som er lagt gennem tyngdepunktet af fanen.
- Herudover kan der foretages beregninger for et selvvalgt kontrolpunkt og filterlængde.





Formål med GrundRisk risikovurdering

Koncentration i en nedstrøms indvindingsboring

- Koncentrationen i en indvindingsboring kan beregnes for en standardindvinding (10.000 m³/år) eller en lokalitetsspecifik indvindingsrate.
- Koncentrationen i indvindingsboringen C_{indv} beregnes som fluxen J divideret med indvindingsraten Q :

$$C_{indv}(\mu g/L) = \frac{J \left(\frac{kg}{\text{år}} \right)}{Q \left(\frac{m^3}{\text{år}} \right)} \cdot \left(\frac{10^9 \mu g/kg}{1000 \frac{L}{m^3}} \right)$$

- Det antages konservativt at nedbrydning kun forløber over strækningen fra kilden til kontrolpunktet 100 m nedstrøms. Efter 100 m regner GrundRisk ikke med nedbrydning. Dette skyldes at der er store usikkerheder ved at antage at de rette nedbrydningsbetingelser er tilstede over større skalaer.



1.2 Beregningsresultater med GrundRisk risikovurdering

Beregningsresultater for kontrolpunkt:

- Koncentrationen i grundvandet ($\mu\text{g/l}$)
- Overskridelsesfaktoren i forhold til grundvandskvalitetskriteriet
- Forureningsfluxen ($\text{g}/\text{år}$)
- Koncentrationen i indvindingsboringen ($\mu\text{g/l}$)

The screenshot shows the 'Resultater' (Results) page in GrundRisk. It details the calculation for Benzen (Benzene) using a homogeneous saturated soil model with first-order decay. The results for a control point 100m downstream with 2m of filter are as follows:

Resultat for kontrolpunkt (100 m nedstrøms, 2 m filter)	
Koncentration:	24,5 $\mu\text{g/L}$
Overskridelsesfaktor:	24,5
Flux:	0,0102 $\text{kg}/\text{år}$
Opblandet koncentration i indvinding/fiktiv indvinding:	1,02 $\mu\text{g/L}$
Kvalitetskriterie:	1 $\mu\text{g/L}$
Risikovurdering:	○ Risiko

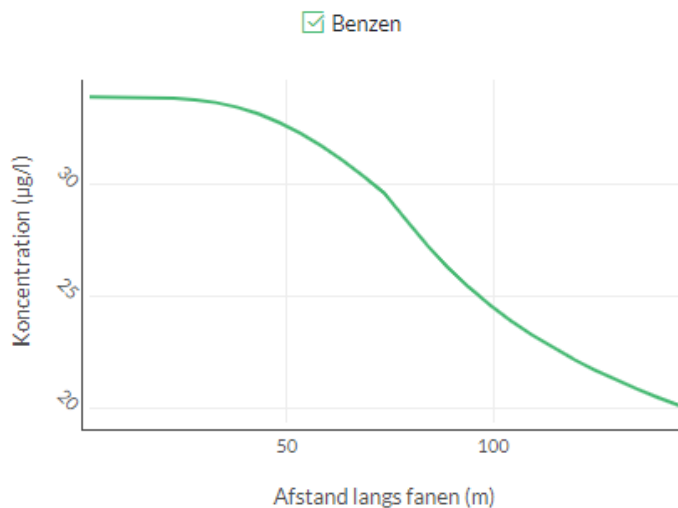
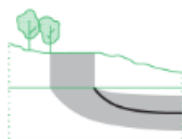
(*) fiktiv værdi er anvendt.

Beregningsresultater med GrundRisk risikovurdering

Resultatgrafer for grundvandsmagasinet:

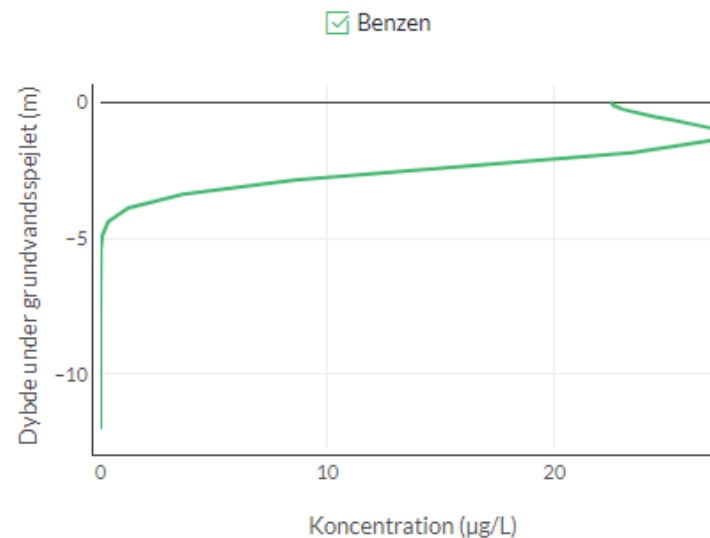
Koncentration langs fanen

Figuren viser koncentrationerne langs fanen (x-aksen). De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over den valgte filterlængde, og er beregnet for dybderne med de højeste koncentrationer. Nulpunktet på x-aksen angiver placeringen af forureningskildens nedstrøms kant.



Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms

Figuren viser koncentrationens variation over dybden i en nedstrøms afstand svarende til det kontrolpunkt, der kigges på.

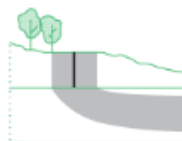


Beregningsresultater med GrundRisk risikovurdering

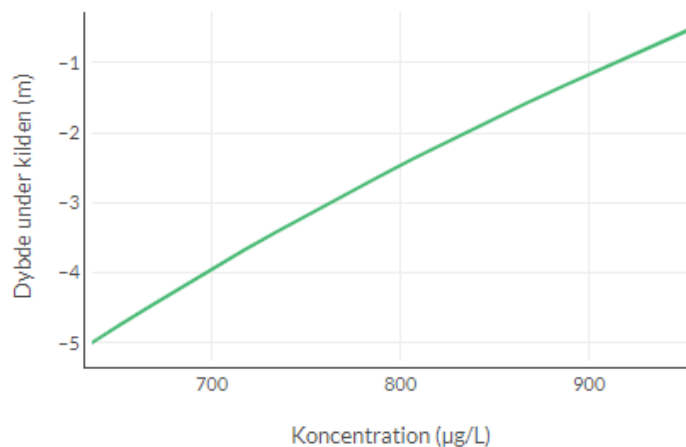
Resultatgrafer for den vertikale transport (over grundvandsspejlet):

Koncentration over grundvandsspejlet

Figuren viser koncentrationens variation over dybden fra forureningskilden og ned til grundvandsspejlet.

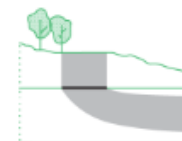


☑ Benzen

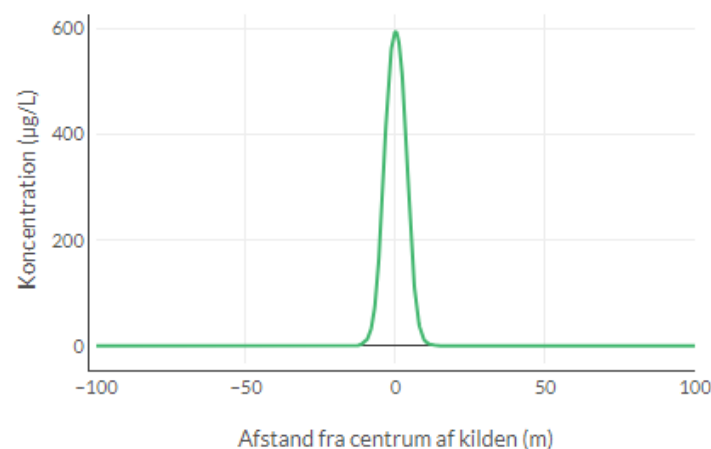


Koncentrationen ved toppen af grundvandet

Figuren viser forureningskoncentrationens variation lige over grundvandsspejlet.



☑ Benzen



Denne graf er kun relevant for model 3 og 4. For de øvrige modeller er koncentrationen ved grundvandsspejlet konstant over arealet



Beregningsresultater med GrundRisk risikovurdering



Resultater kan også hentes ned i pdf eller i csv-format

Valgmuligheder

Eksporter:

Vælg format

PDF

CSV

Se parameterliste

Godkend beregning

GrundRisk - Resultater

12/05/2022

Danmarks Miljøport

Lokalitet: 101
Test

Beregning

Forureningsstof:

Benzen

Beregningsmodel:

1 Homogen vandmættet ler

Nedbrydning:

1. ordens nedbrydning

Forureningskilde:

Skibe

Størrelse:

5000 m²

Langsids afslut:

5 m

Bredde af kile:

20 m

Indvindingshastighed:

200 m³/år

Indvindingsområde:

200 m²

Indvindingsområde:

200 m²

Vertikal transport:

Max tykkelse af grundbænk (højst 10 m):

20 m

Grundbænkdybde:

5 m

Procent:

0,25

Langsids afslut (højst 10 m):

0,25

1. ordens nedbrydningsrate:

0,25

Størrelse:

0,25

Langsids afslut (højst 10 m):

0,25

Resultater for nedstrøms kontrolpunkter

Resultat for kontrolpunkt (100 m nedstrøms, 2 m filter)

Koncentration: 24,8 µg/L
Overskridelsesfaktor: 24,8
Flux: 0,0113 kg/år
Opblandet koncentration i indvinding/fiktiv indvinding: 1,13 µg/L
Kvalitetskriterie: 1 µg/L
Risikovurdering: Risiko

(*) fiktiv værdi er anvendt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Lokalitet	101	Test											
2	Forurening	Benzen												
3	Beregningsmodel	Homogen vandmættet ler												
4	Nedbrydning	1. ordens nedbrydning												
5	Forureningskilde	Skibe												
6	Størrelse	5000 m ²												
7	Langsids afslut	5 m												
8	Bredde af kile	20 m												
9	Indvindingshastighed	200 m ³ /år												
10	Indvindingsområde	200 m ²												
11	Indvindingsområde	200 m ²												
12	Porositet	0,25												
13	Langsids afslut	0,25												
14	Grundbænkdybde	5 m												
15	1. ordens nedbrydningsrate	0,25												
16	Langsids afslut	0,25												
17	Størrelse	0,25												
18	Langsids afslut	0,25												
19	Transport	0,25												
20	Vertikal afslut	0,25												
21	Indvindingsområde	0,25												
22	Koncentration	2,2	7,3	12,4	17,5	22,6	27,7	32,8	37,9	43	48,1	53,2	58,3	63,4
23	Koncentration	33,948	33,945	33,942	33,93	33,897	33,826	33,696	33,49	33,196	32,809	32,33	31,784	31,11
24	Koncentration	0	-0,133	-0,267	-0,4	-0,533	-0,667	-0,8	-0,933	-1,067	-1,2	-1,333	-1,467	-1,6
25	Koncentration	22,496	22,492	22,484	22,466	22,419	22,302	22,109	21,817	21,429	21,017	20,584	20,128	19,656
26	Resultater	2022091212198												



Beregningsresultater med GrundRisk risikovurdering

CSV filen indeholder:

Input parametre

Resultater

Lokalitet	C1_csnm - BTEX-forurening i vandmættet ler				
Forureningsstof	PFOS				
Beregningsmodel	Homogen vandmættet ler				
Nedbrydning	1. ordens nedbrydning				
PFOS	70 µg/L				
Længde af kilde	2 m				
Bredde af kilde	2 m				
Infiltration i kildeområde	2 mm/år				
Infiltration over fanen	200 mm/år				
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin	30 m				
Porøsitet	0,4				
Longitudinal dispersivitet (z-retning)	0,1 m				
1. ordens nedbrydningsratePFOS	0 d-1				
Mægtighed af grundvandsmagasinet (fra top til bund)	5 m				
Grundvandshastighed	21,024 m/år				
Hydraulisk konduktivitet	0 m/s				
Hydraulisk gradient	0,002				
Porøsitet	0,3				
1. ordens nedbrydningsratePFOS	0 d-1				
Longitudinal dispersivitet (x-retning)	1 m				
Transversal dispersivitet (y-retning)	0,01 m				
Vertikal dispersivitet (z-retning)	0,005 m				
Indvindingsrate ved nærmeste indvinding	10.000 m3/år				
Koncentration langs fanen - Afstand langs fanen(m) - PFOS	2,9	7,8	12,7	17,6	22,5
Koncentration langs fanen - Koncentration(µg/l) - PFOS	0,022	0,021	0,021	0,02	0,019
Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms - Dybde under grundva	0	-0,317	-0,634	-0,951	-1,268
Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms - Koncentration (µg/L) -	0	0	0	0,001	0,002
Koncentration over grundvandsspejlet - Koncentration (µg/L) - PFOS	70	70	70	70	70
Koncentration over grundvandsspejlet - Dybde under kilden (m) - PFOS	0	-1,579	-3,158	-4,737	-6,316
Koncentrationen ved toppen af grundvandet - Dybde under kilden (m) - PFOS					
Koncentrationen ved toppen af grundvandet - Koncentration (µg/L) - PFOS					

Resultater over afstand langs
fanen (m)



1.3 Overordnede forudsætninger og antagelser i GrundRisk

Alle GrundRisk modeller

- er **stationære** modeller, der beregner koncentrationen i det nedstrøms punkt, når der er sket fuldt gennembrud af forureningsfanen i beregningspunktet
- beskriver påvirkningen fra en punktkilde med en **konstant kildekonzentration** C_0
- antager **homogene forhold**. Dvs. at en række parametre er konstante i tid og sted f.eks. hydraulisk gradient, hydraulisk ledningsevne, vandindhold, porøsitet, bulk densitet
- kan inkludere **nedbrydning** beskrevet som 1. ordens nedbrydning eller sekventiel 1. ordens nedbrydning
- antager at **sorption** kan beskrives som en lineær og reversibel proces, der indstiller sig øjeblikkeligt.
- antager at nedbrydning udelukkende sker i vandfasen.

Som følge af ovenstående antagelser om stationaritet, lineær sorption og nedbrydning i vandfasen, vil sorption ikke have nogen nettoindflydelse på de beregnede koncentrationer i kontrolpunktet



1.4 Hvilke forureningsstoffer kan GrundRisk håndtere?

- GrundRisk er, ligesom JAGG, udviklet til **organiske forureningsstoffer** (fx chlorerede opløsningsmidler, oliestoffer etc.)
- Spredningen af **metaller** kan være væsentligt påvirket af processer som ionbytning, kompleksering og udfældning/opløsning. Dette tages der ikke højde for i GrundRisk.
- Stoffet "chlorid" kan vælges for at modellere spredningen af et **sporstof** (en tracer)
- **Stærkt sorberende stoffer** – her kan det ikke antages, at der er opnået stationaritet/ligevægt i kontrolpunktet, hvilket kan medføre at koncentrationen i kontrolpunktet overestimeres.
- For **kulbrinter** fokuseres der på de mest mobile fraktioner, se næste slide



1.5 Hvordan håndteres kulbrinter i GrundRisk?

Anbefalinger baseret på Miljøstyrelsen (2018b):

- For de to letteste kulbrintefraktioner i jordpakken (C6-C10 og >C10-C15) anvendes dodecan som modelstof, og en nedbrydningsrate indenfor intervallet for BTEXN'erne kan anvendes.
- For de to tungeste kulbrintefraktioner i jordpakken (>C15-C20 og >C20-C35) vurderes det, at deres opløselighed er så lav og deres sorptionsevne så høj, at de sjældent vil være et problem i det "administrative punkt" 100 m nedstrøms i grundvandet. Der er derfor ikke et modelstof for disse i GrundRisk.
- Hvis der er mistanke om BTEXN forurening på en given lokalitet, analyseres særskilt for disse forureningsstoffer, og der regnes særskilt for dem.

BTEXN: Benzen, Toluen, Ethylbenzen,
Xylener og Naphtalen



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

GrundRisk – Opbygning, datakilder og informationsflow

Kapitel 2

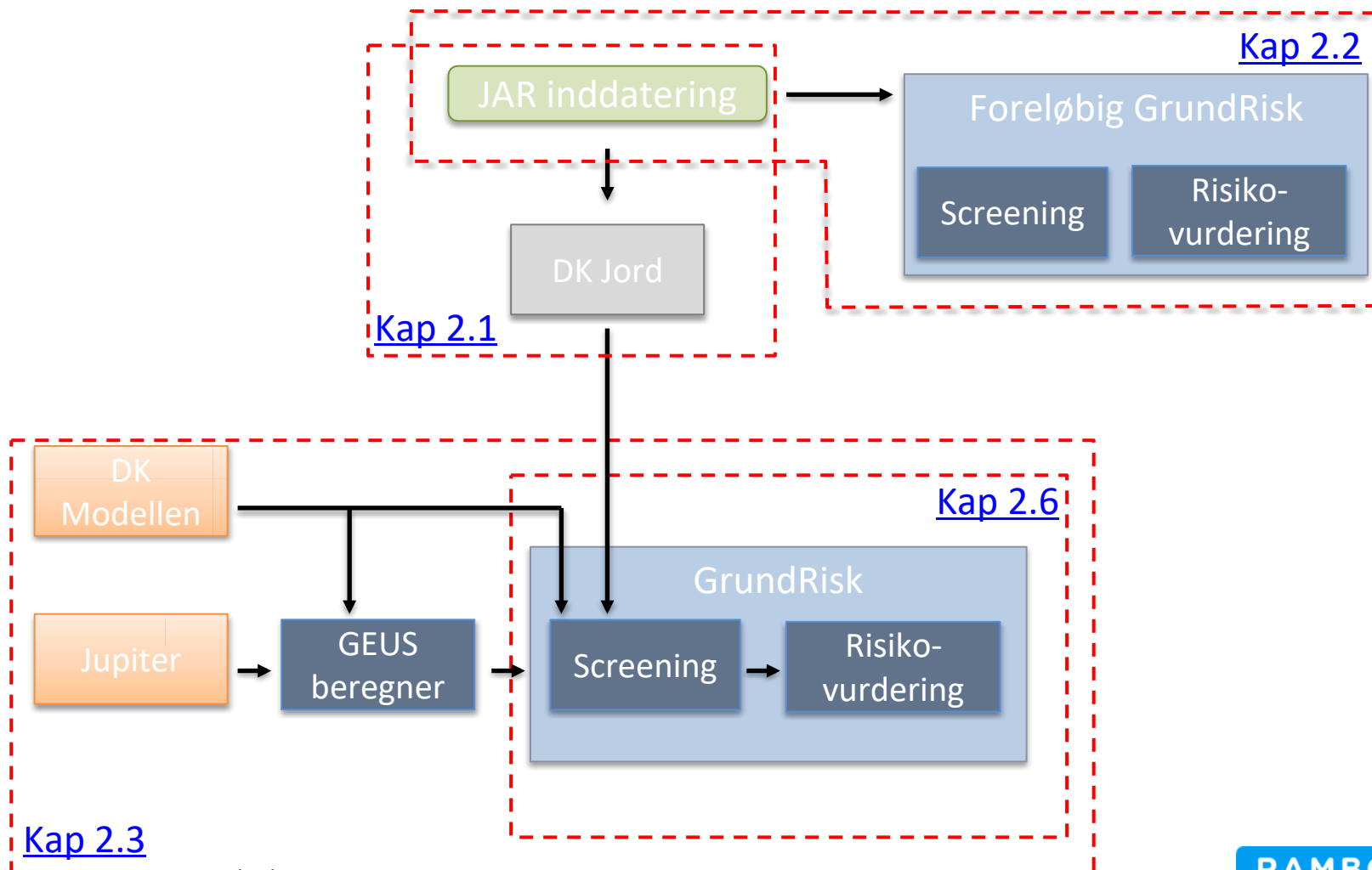


GRUNDRISK – opbygning, datakilder og informationsflow

I dette kapitel beskriver vi dataflowet i GrundRisk, både screeningsværktøjet og i risikovurderingsværktøjet. Vi beskriver begge værktøjer fordi der i screeningsværktøjet genereres et datasæt som *kan* anvendes i forbindelse med risikovurderingsværktøjet.



Oversigt over datakilder i GrundRisk





Informationsflow mellem GrundRisk og JAR

JAR "taler" med GrundRisk via en kanal hvor:

GrundRisk "lytter" til DK jord og opfatter ændringer som bl.a. kommer fra inddateringer af lokaliteter fra JAR

JAR "taler" samtidig med foreløbige GrundRisk:

Den foreløbige risikovurdering og den foreløbige screening benytter data fra JAR. Resultater kan tilgås via et link til "Foreløbig screening" og "Foreløbig risikovurdering"



Kapitel 2.1 Hvordan kommer lokaliteter ind i GrundRisk Screening og Risikovurdering?

En lokalitet kan fremsøges i Risikovurderingen af to årsager:

- Hvis lokaliteten er screenet til risiko (dvs. risikofaktor > 1)
- Hvis der på lokaliteten er udført en videregående undersøgelse, afværgelse, drift eller monitoring i forhold til den offentlige grundvandsindsats.

Der kan være forskellige årsager til, at en lokalitet ikke kan fremsøges i Risikovurderingen, men hvis lokaliteten er kortlagt og i JAR er angivet med offentlig indsats i forhold til grundvand – kan man forsøge at fremsøge lokaliteten i Screeningen. Hvis lokaliteten ligger her og er screenet til "Ingen risiko" kan lokaliteten revurderes, hvorefter den vil fremgå af Risikovurdering.

Matrikler 1 **JAR Offentlig indsats i forhold til grundvand** ↗ ⬇

Matrikel	Nuværende anvendelse/GIS								Vurdering af den offentlige indsats								
	R.Lok.	OSD	Ind.opl.	OFV	Natur	Bolig	Inst.	Lege	OSD	Ind.opl.	CFV	Natur	Bolig	Inst.	Lege	Miljø	Ingen
Matrikel a		X	X						X	X							
Lokalitet samlet		X	X						X	X							

▼ Overfladevand screening

Type	Dato	Recipient	Stofnavn	Faktor
Automatisk	30-11-2016 18:18:59	Udenfor afstandskriterier		

Hent Beregn

▼ GrundRisk screening

Type	Dato	Stofnavn	Faktor	Revurderet	Flag
Screening	04-03-2021 15:19:17	Benzin	1,85	Nej	🚩

Hent Beregn

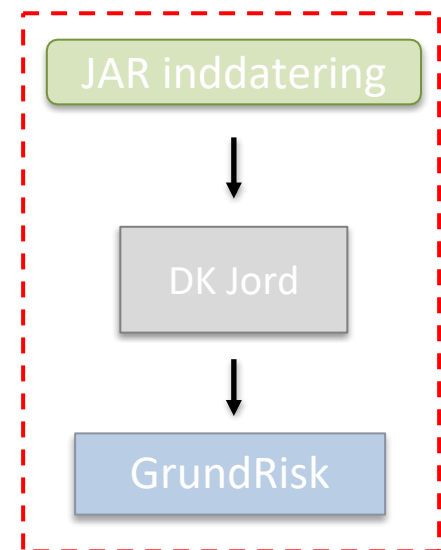
Oktober 2023



Informationsflow mellem GrundRisk, JAR og DK Jord

Følgende data overføres fra JAR via DK jord til GrundRisk sammen med lokaliteten:

- Lokalitets nr.
- Areal af forureningskilde
 - V1 kortlagte lokaliteter, standardarealer
 - V2 kortlagte lokaliteter, det kortlagte areal
- Branche og aktiviteter (Kun med kortlægningsårsag = Ja)
- Stoffer kun for V2 kortlagte lokaliteter og kun de stoffer som er indberettet til JAR
- Projekter/faser som bl.a. fortæller, hvor langt en lokalitet er i den offentlige grundvandsindsats

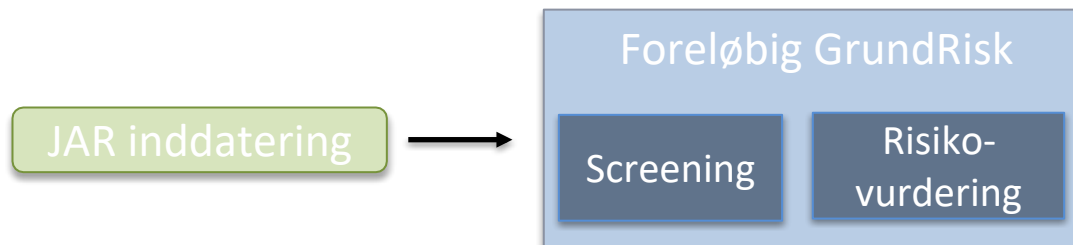




Kapitel 2.2 Hvornår anvendes den foreløbige risikovurdering

Den foreløbige risikovurdering anvendes når der sker en kortlægning direkte på V2.

Den foreløbige screening* anvendes i forbindelse med at man V1 kortlægger en lokalitet.



*Denne indgår ikke yderligere i kursusmaterialet som er målrettet GrundRisk Risikovurderingen.



Den foreløbige Risikovurdering startes i JAR

Man tilgår den foreløbige risikovurdering via JAR, der kan læses mere om hvordan i *"Guide til at komme i gang med GrundRisk Risikovurdering"*.

Type	Dato	Stofnavn	Faktor	Revurderet	Flag
Screening - Foreløbig	31-05-2022 13:51:56	Pentachlorphenol	70125,99		🚩

Hent Beregn Risikov. (Officiel) Risikov. (Foreløbig)
Screening (Officiel) Screening (Foreløbig)

> Befæstelse 0



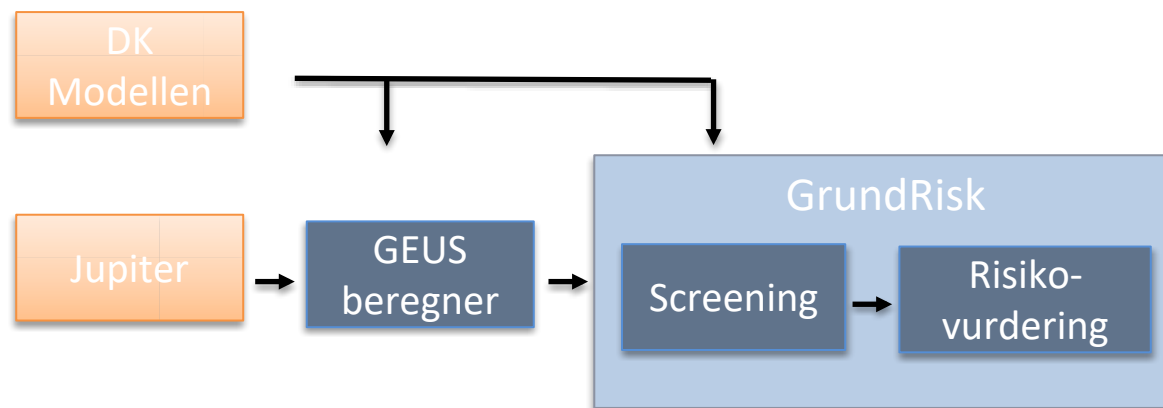
Informationsflow mellem JAR og den foreløbige screening/risikovurdering

Den foreløbige screening henter de samme data i JAR som GrundRisk Screening henter fra DK jord, se listen [her](#).

Derudover anvendes der samme beregningsmodel og datakilder som den officielle GrundRisk Screening og GrundRisk Risikovurdering.

Kapitel 2.3 Oversigt over informationsflow fra Jupiter og DK modellen til GrundRisk

GrundRisk henter information fra Jupiter og DK-modellen. Data anvendes i forbindelse med GEUS beregneren (se kapitel 2.4), som estimerer betydning af et evt. dæklag af ler. Derudover anvendes parametre fra DK- modellen til bl.a. at estimere infiltration.





Når en lokalitet udgår af kortlægning eller af den offentlige grundvandsindsats

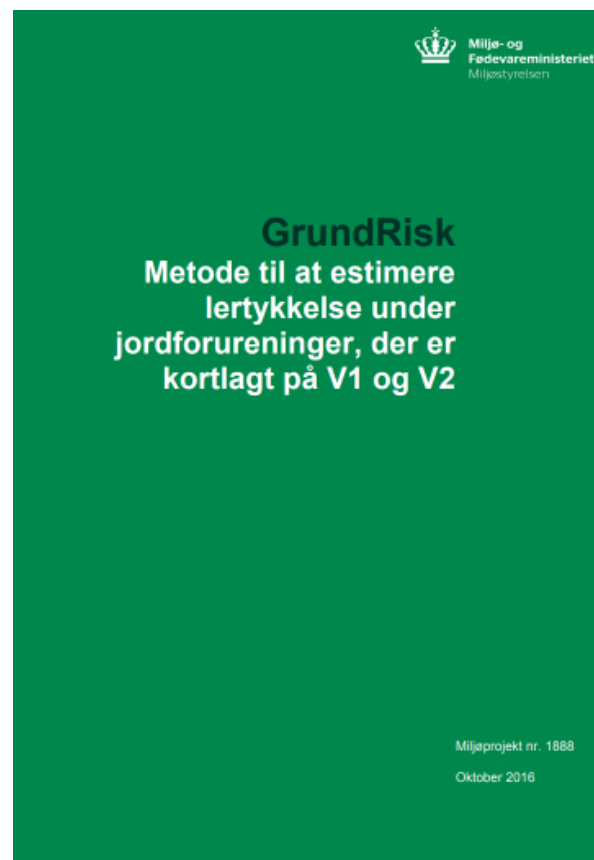
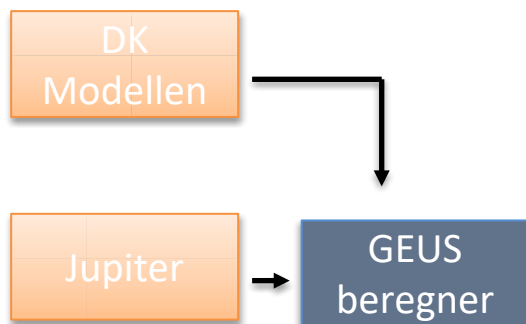
Hvis en lokalitet ikke længere er kortlagt, eller hvis en lokalitet er taget ud af den offentlige indsats i forhold grundvand, så vil disse ændringer blive indberettet til DK-Jord. GrundRisk vil derimod ikke længere kigge på lokaliteterne, og lokaliteterne vil forblive uændret i GrundRisk. Det vil fx betyde, at en lokalitet i GrundRisk kan være angivet som kortlagt, selvom den er taget ud af kortlægningen.



Kapitel 2.4 GEUS beregneren – Estimat af lertykkelse

Miljøstyrelsen har i et projektsamarbejde med DTU Miljø og GEUS udviklet en metode til at estimere dæklagstykkelser under jordforureninger, der er V1 og V2 kortlagt (Miljøstyrelsen, 2016c).

Dæklagstykkelserne anvendes i screeningen, men kan overføres til risikovurderingen, som et supplement til data fra lokaliteten.





Boringsudsøgning ved V1 og V2 kortlagte grunde

Alle boringer med geologi tilgængel i Jupiter databasen....

boringer tilgængelige i Jupiter databasen inddrages til beregning af fordelingen af lagtyper under de kortlagte grunde (Miljøstyrelsen, 2016d).

Udsøgningen af boringer starter med klassificering af datadækningen på lokaliteten i hhv. GOD, MEDIUM og SVAG. Se næste side for en beskrivelse af klassificeringen.



Udsøgning af boringsdata

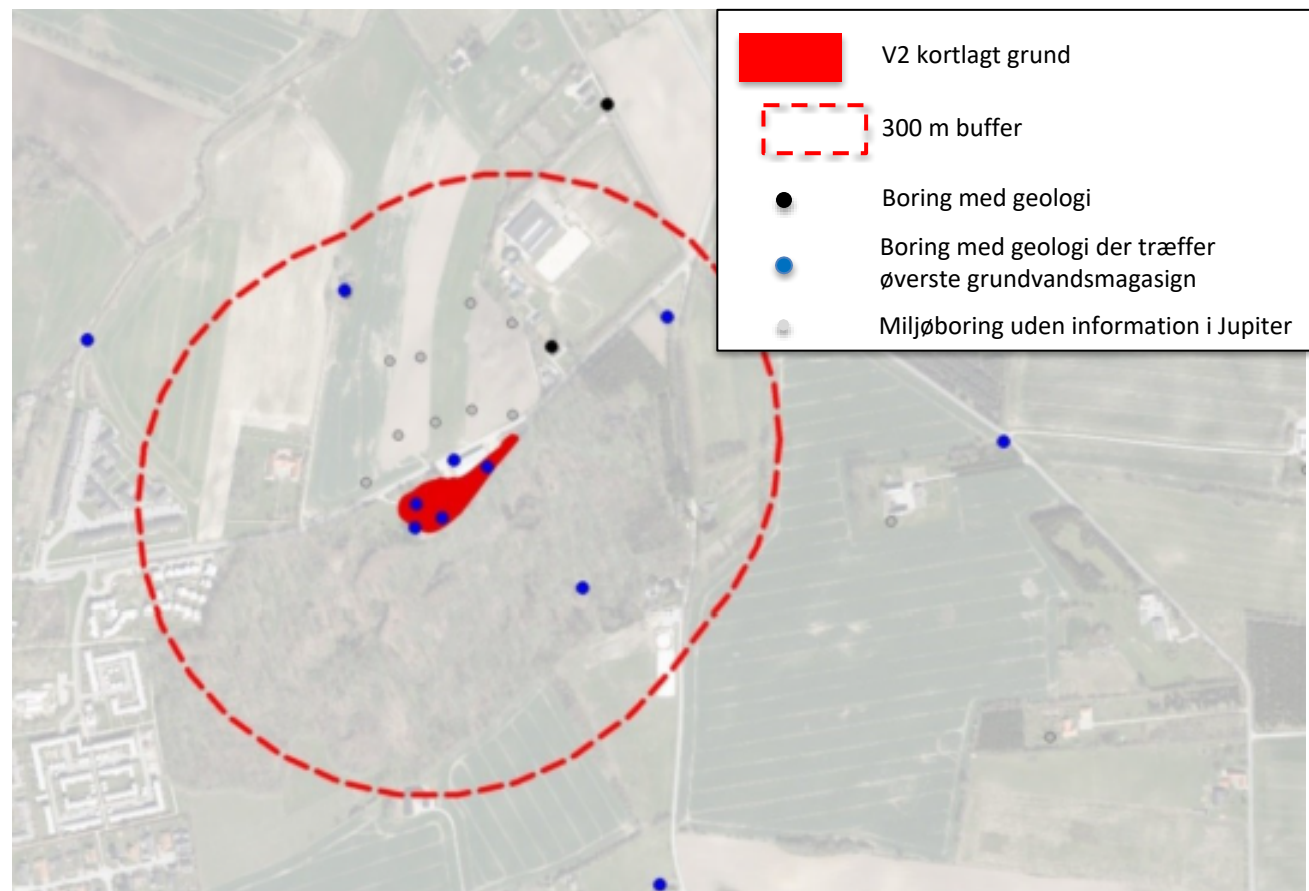
Datadækning	Beskrivelse
GOD	Mindst 4 boringer med geologi i en 300 m bufferzone omkring grunden OG Mindst 2 boringer med geologi der træffer øverste grundvandsmagasin i DK modellen indenfor en 300 m bufferzone omkring grunden.
MEDIUM	Mindst 2 boringer med geologi i en 300 m bufferzone omkring grunden OG Mindst 1 boring med geologi der træffer øverste grundvandsmagasin i DK modellen indenfor en 1000 m bufferzone omkring grunden.
SVAG	Klassen omfatter de resterende V1 og V2 kortlagte grunde, der ikke opfylder kriterierne for god og medium datadækning.

Eksempel på boringsudsøgning ved V2 kortlagt grund

Klassificering GOD

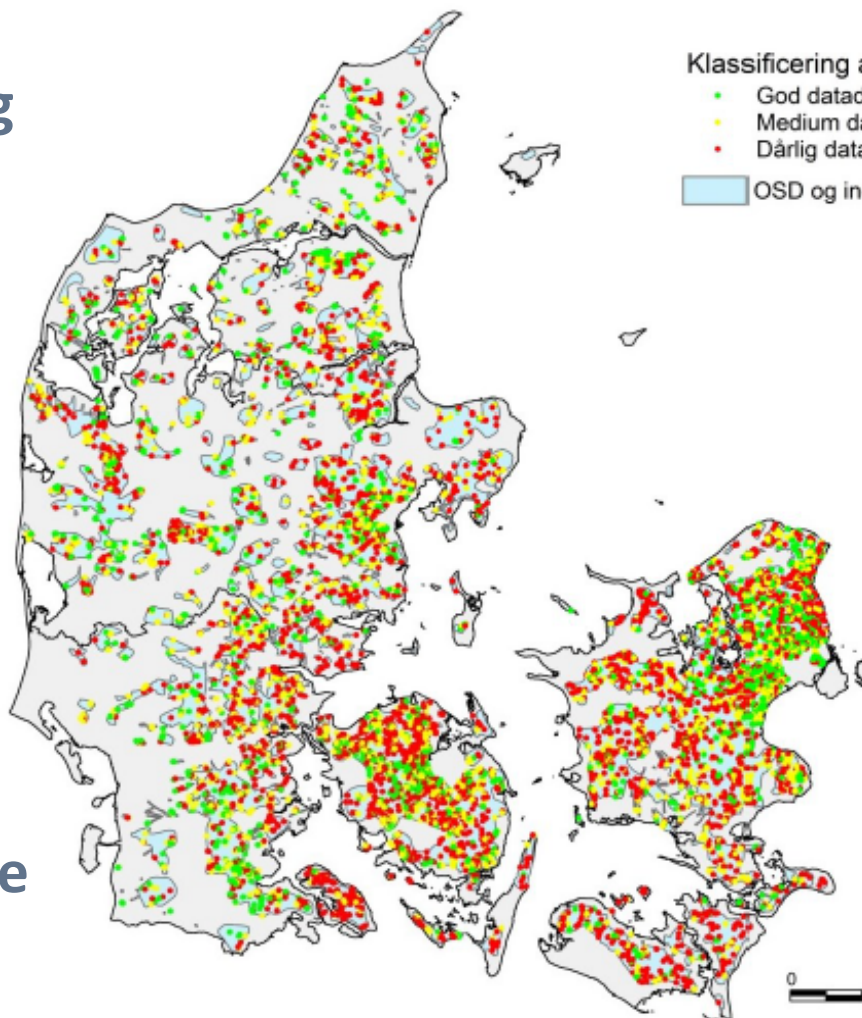
Der er 9 boringer med geologi indenfor den viste 300 m buffer

Heraf 8 boringer der træffer det øverste grundvandsmagasin (blå prik)





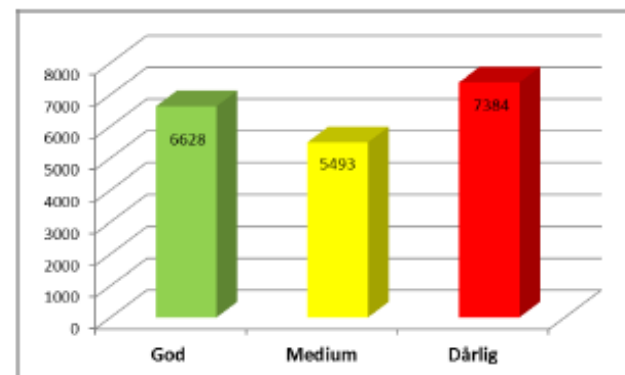
Eksempel på datadækning



Klassificering af grunde

- God datadækning
- Medium datadækning
- Dårlig datadækning

■ OSD og indiv. oplande udenfor OSD



Kortet er
efterfølgende
opdateret



Betydning af datadækning for estimering af lertykkelser

Datadækningen har betydning for hvor langt væk fra grunden, der medtages boringer i estimatet:

- Ved **god datadækning** gennemføres en beregning, hvor alle beskrevne boringer indenfor **300 m buffer** omkring grundens areal indgår.
- Ved **medium datadækning** gennemføres en beregning, hvor alle beskrevne boringer indenfor **1000 m buffer** omkring grundens areal indgår.
- Ved **svag datadækning** gennemføres en beregning, hvor alle beskrevne boringer indenfor **1000 m buffer** omkring grundens areal og **supplerende laginformation fra DK-modellen** inddrages.



Beregning af dæklagstykkelser over det øverste grundvandsmagasin

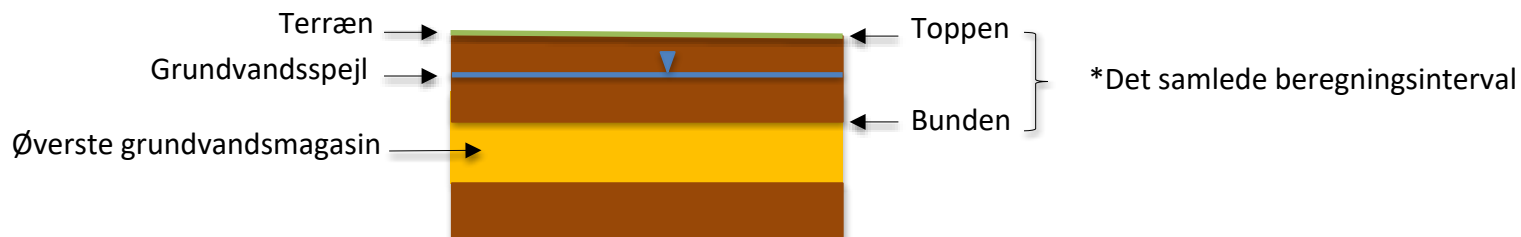
Ved estimering af dæklagstykkelser over det øverste grundvandsmagasin benyttes bl.a. følgende data fra Jupiter databasen:

Data fra Jupiter databasen	
Beskrivne boringer	Boringer med lithologiske oplysninger fra enten brøndborer-beskrivelse eller geolog-beskrivelse.
Lithologier	<i>Gruppe 1) Fed ler Gruppe 2) Moræneler, sandet ler, st. siltet ler, ler (uspecificeret) Gruppe 3) Sand Gruppe 4) Grus og sten Gruppe 5) Gytje, tørv og brunkul Gruppe 6) Kalk Gruppe 7) Fyldjord Gruppe 8) Ukendt</i>

Principperne i forbindelse med udvælgelse af top og bund

Toppen af det samlede beregningsinterval defineres ud fra terrænkoten på den enkelte grund.

Bunden af det samlede beregningsinterval defineres af dybden til det øverste grundvandsmagasin, dvs. dybden til det lithologiske lag. Denne hentes fra DK modellen.

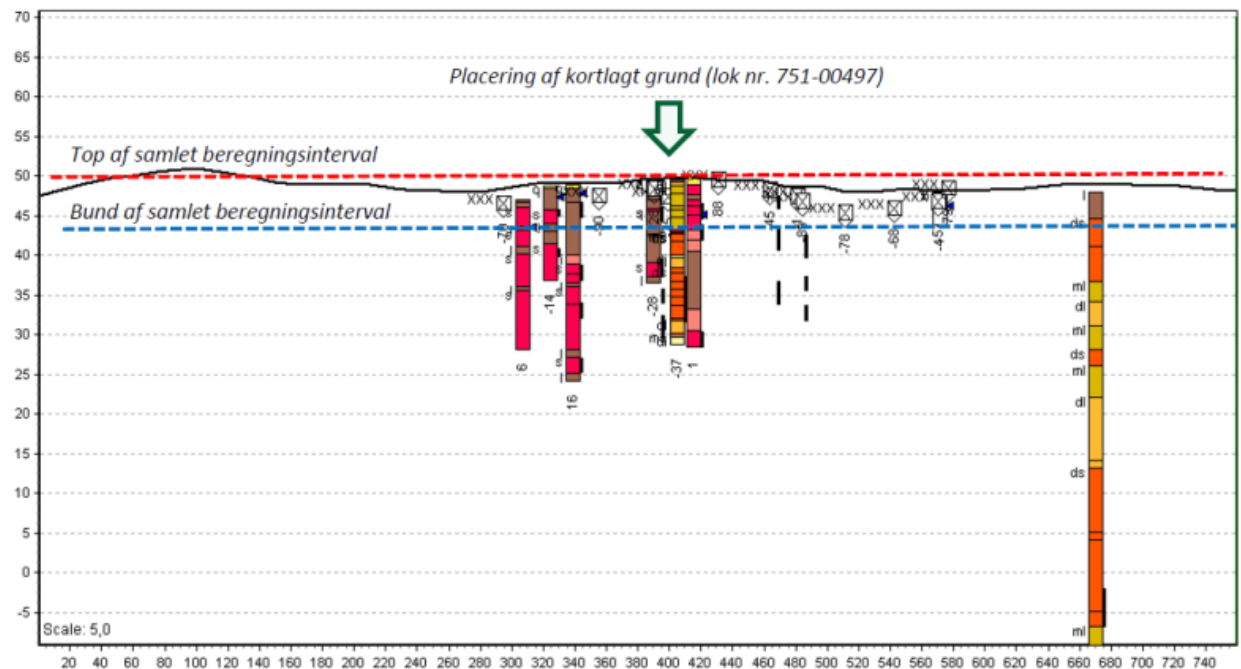




Principperne i forbindelse med udvælgelse af top og bund

TOP: Grunden er beliggende i kote 50 m

BUND: Den mindste dybde til toppen af øverste grundvandsmagasin i DK – modellen er indenfor 300 m udsøgt til at findes 6 m.u.t. (stiplet blå linje)



Data fra Miljøportalen og Jupiter, juni 2016 (Miljøstyrelsen, 2016c)



Estimat af dæklagstykkelsen over det øverste grundvandsmagasin

Vægtning af boringer: De boringer som inddrages i beregningen af dæklagstykkelse ved en given grund er **vægtet forskelligt** alt efter boringernes afstand til grunden.

Lithologien (lagtypen) for de enkelte lag (0-5, 5-10, 10-15 m.u.t. etc.) beregnes ud fra de vægtede gennemsnit for 5 meters dybdeintervaller over det samlede beregningsinterval*.

* Beregningsintervallet starter i toppen og slutter med det øverste grundvandsmagasin. Hvor dybden til det øverste grundvandsmagasin er dybden til det lithologiske lag, dvs. ikke vandspejlet.



Kompleks geologi

Der anvendes geomorfologiske kort eller Per Smeds kort til at vurdere om geologien er kompleks (MST, 2016c).

For følgende landskabselementer er det vurderet at der er kompleks overfladenær geologi:

- Isoverskredet randmoræne
- Randmorænebakker
- Dødislandskaber



Input til GEUS beregneren

Kilde	Data til GEUS beregneren	
Danmarks Miljøportal	Jordforureningstema	V1 og V2 kortlagte grunde. Automatiseret datatræk fra Miljøportalen via en web server som udstiller relevante features (WFS)
	Drikkevands- og grundvandstema	Områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD) og Indvindingsoplände udenfor OSD. Automatiseret datatræk fra Miljøportalen via WFS.
DK-modellen	Dybde og udbredelse af øverste magasin	Dybden og udbredelsen af det øverste magasin i DK-modellen.
	Supplerende information når data-dækningen er svag	Laginformation fra seneste version af DK-modellen. Der indregnes en "pseudoboring", der placeres i centroiden af den "svagt" kategoriserede grund, og dermed vægtes 100 %.
Jupiter databasen	Nærmeste aktive vandforsyningsboring	Aktive almene vandforsyningsboringer i Jupiter databasen er boringer med en gældende indvindingstilladelse, som ikke er sløjfet, og hvor anvendelsen er angivet som enten vandforsyningsboring, vandværksboring, reserveboring eller reserve-/nødvandsboring. Markvandingsboringer og private brønde mv. er ikke medtaget i udsøgningen.
	Nærmeste boring uden lerlag	Udsøgning af nærmeste boring uden beskrevet ler.
	Beskrevne boringer	Det primære datagrundlag i applikationen til estimering af lertykkelser over grundvandsressourcen. Indeholder også information om lithologi.



Output fra GEUS beregneren

Data fra GEUS beregneren til GrundRisk screeningen	
Datadækning	Lokaliteten tildeles enten kategorien SVAG, MEDIUM eller GOD
Geologisk heterogenitet	Information (kompleks: JA/NEJ) omkring den geologiske heterogenitet
Top og bund af geologisk lagfølge	Toppen af det samlede beregningsinterval og bunden af det samlede beregningsinterval
5 m beregningsintervaller	Tykkelser af lagtyperne beregnes i 5 meters beregningsintervaller (0-5 m, 5-10 m, 10-15 m).
Lithologi	Lagtyper (Fyld, Moræneler etc.) inddelt i 5 meters intervaller over beregningsintervallerne
Nærmeste aktive vandforsyningsboring	Den nærmeste aktive vandforsyningsboring udsøges i Jupiter databasen.



Kapitel 2.5 Data fra Den Nationale Vandressource Model (DK modellen)

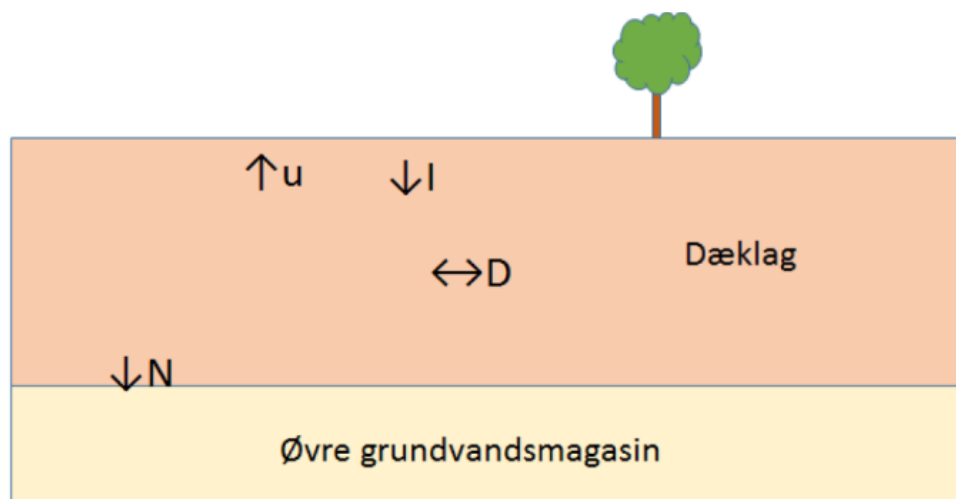
Den Nationale Vandressource Model (DK-modellen) indgår som et centralt element i estimering af dæklagstykkelser ([se 2.4](#)) men også i forhold til parametre for grundvandsmagasinet, da DK-modellen er vurderet til at være det bedste landsdækkende datasæt til udtræk af flere nødvendige hydrologiske og hydrogeologiske parametre (MST, 2016c).

DK-modellen anvendes inden for den nationale grundvandsovervågning, grundvandskortlægning og forvaltning af ferskvandsressourcen i Danmark, og det betyder, at anvendelsen i GrundRisk, der er punktkildeorienteret, nødvendiggør visse forbehold, se mere i (MST, 2016c).

Infiltration

Der anvendes flere parametre fra DK modellen i GrundRisk. En af de væsentligste er infiltrationen, som anvendes i både Screeningen og Risikovurderingen.

Der er pba. data fra DK modellen beregnet et landsdækkende datasæt for infiltrationen ned til det øverste grundvandsmagasin (N på figuren her under). I beregningen tages der højde for nettonedbøren (I), afløb af vand der ikke infiltreres til magasinet (D) og fordampning (u). Det skal bemærkes at infiltrationen er en væsentlig parameter og adskiller sig fra nettonedbør pga. figurens (D), som afhænger af dæklaget. Forslag til værdier kan ses på slide [202](#).



M: Den gennemsnitlige grundvandsdannelse til øverste magasin.

I: Nettonedbøren

D: Afløb af vand der ikke infiltreres til magasinet

u: Fordampning.

N: Infiltrationen til det øverste grundvandsmagasin



Oversigt over data fra DK modellen

Udover de data som bruges i GEUS beregneren og infiltrationen, anvender GrundRisk følgende parametre fra DK modellen.

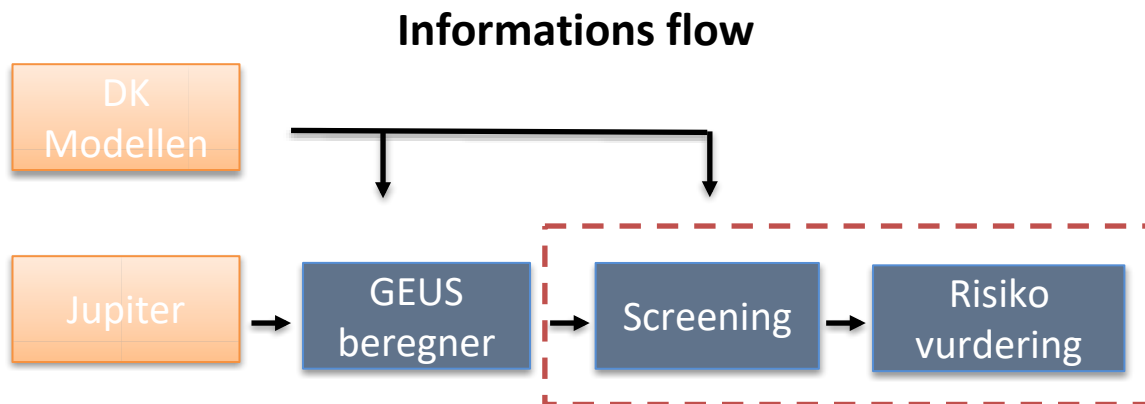
Data fra GEUS beregneren til GrundRisk screeningen	
Strømningsretning	Ved en antagelse af homogene hydrauliske forhold i det øvre grundvandsmagasin er der ud fra simuleret trykniveau beregnet en strømningsretning i magasinet.
Hydraulisk gradient	Der er beregnet en gradient på grundlag af simuleret trykniveau.
Infiltration	Der er foretaget en beregning af infiltrationen til det øverste grundvandsmagasin.
Magasintype	Typen af det øverste magasin udsøges ud fra centroiden på lokaliteten.



Kapitel 2.6 Data som kan overføres fra GrundRisk Screening til GrundRisk Risikovurdering

Når man udfører en beregning med GrundRisk Risikovurdering pba. en tidligere udført screening, vil nogle parametre blive videreført fra Screeningen. Der er tale om:

- Infiltration (Fra DK modellen)
- Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin (Fra DK modellen)
- Stofnavn, kun stoffer med et CAS-nummer (Fra DK jord)





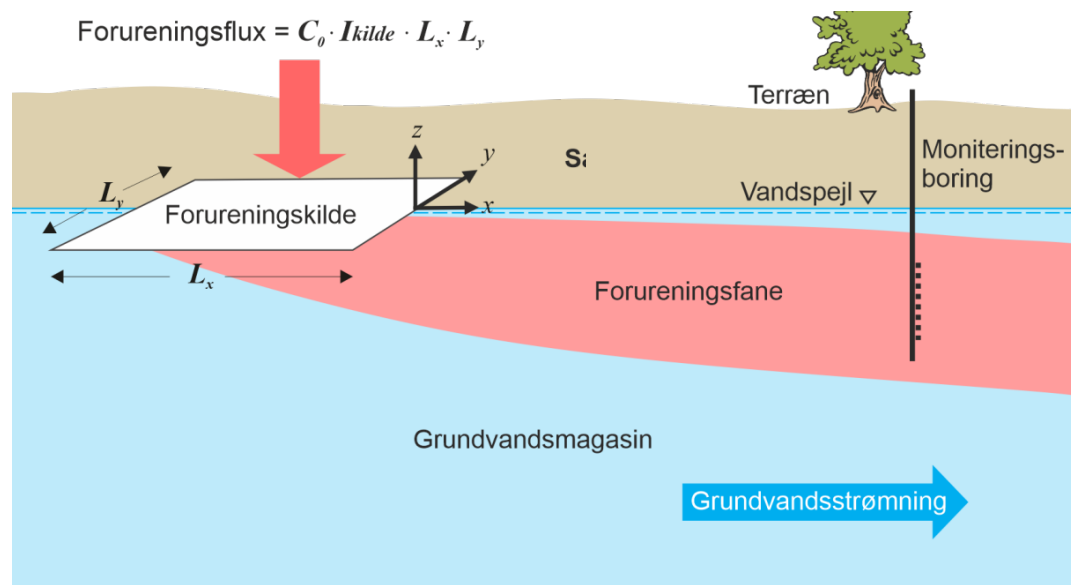
Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Grundlæggende principper i den horisontale stoftransportmodel (grundvandstransporten)

Kapitel 3

3.1 Processer i den horisontale stoftransportmodel (grundvandstransporten)

- Horizontal forureningskilde
- Forureningsflux til grundvandsmagasinet fra forureningskilde
- Infiltration (både gennem forureningskilden og til forureningsfanen)
- Dispersion i 3 dimensioner (3D) samt 2D løsning for tynde grundvandsmagasiner
- 1. ordens nedbrydning
- Sekventiel 1. ordens nedbrydning
- Lineær sorption



Processerne gennemgås på de følgende slides



Stoftransportligning

Den horisontale model bygger på følgende stoftransportligning, der tager højde for lineær sorption, advektion, dispersion i 3 dimensioner samt 1. ordens nedbrydning:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \lambda c = 0$$

Retardations-
faktor

$$R = 1 + \frac{\rho_b k_d}{n}$$

Grundvands-
hastighed i x-
retningen

Dispersions-
koefficienter i
x-, y- og z-
retning

1. ordens
nedbrydnings-
rate

Miljøstyrelsen (2016b)

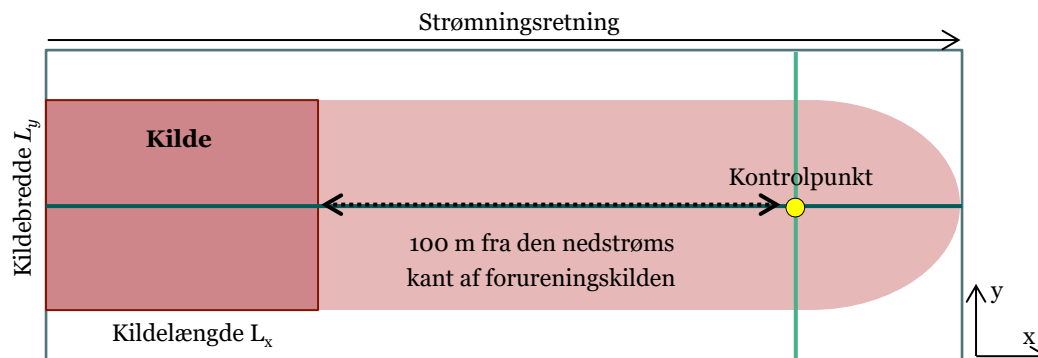
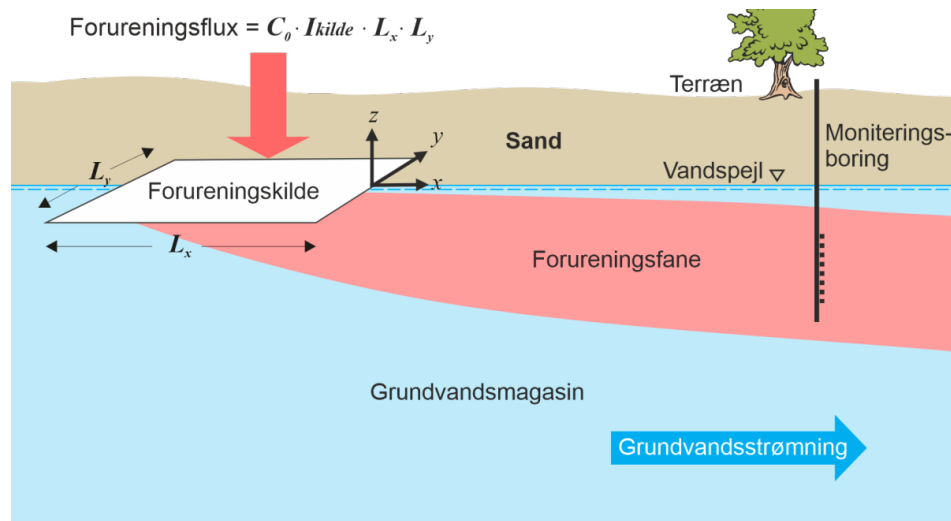
Forureningskilde

Kontinuert kilde

- Kildeareal beskrevet ved længde L_x (langs grundvandsstrømning) og bredde L_y (på tværs af grundvandsstrømning)
- Konstant kildekonzentration C_0
- Infiltration gennem kildeområdet I_{kilde}
- Forureningskilden giver en konstant nedadrettet flux J til grundvandsmagasinet:

$$J = C_0 I_{kilde} L_x L_y$$

Forureningskilde og forureningsfane set oppefra. Det gule punkt repræsenterer placeringen af kontrolpunktet 100 m nedstrøms fra kildeområdet. (Miljøstyrelsen, 2016b).

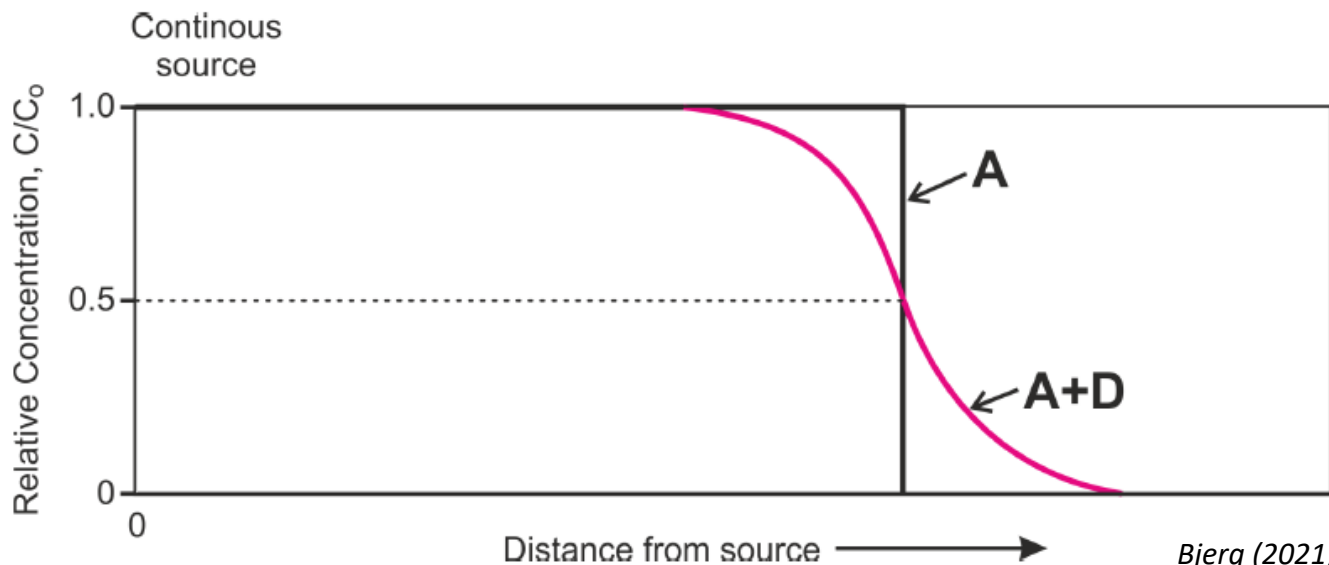


Gennembrudskurve - kontinuert kilde

- Konstant C_0
- Den sorte kurve viser gennembrudskurven for en kontinuert kilde udelukkende påvirket af advektion
- Den røde kurve viser en gennembrudskurve for en kontinuert kilde påvirket af både advektion og dispersion

Advektion: Stoftransport som følge af vandets strømning

Dispersion: Udspredding af forureningsfanen som følge af strømning i porøst medium



A: Advektion
D: Dispersion



Advektion

- Advektion betegner den proces hvor forureningsstoffet transporteres som følge af vandets strømning.
- Den gennemsnitlige strømningshastighed i grundvandet u er styret af trykforskelle i grundvandet samt jordens hydrauliske konduktivitet og porøsitet:

$$u = \frac{K \cdot i}{n}$$

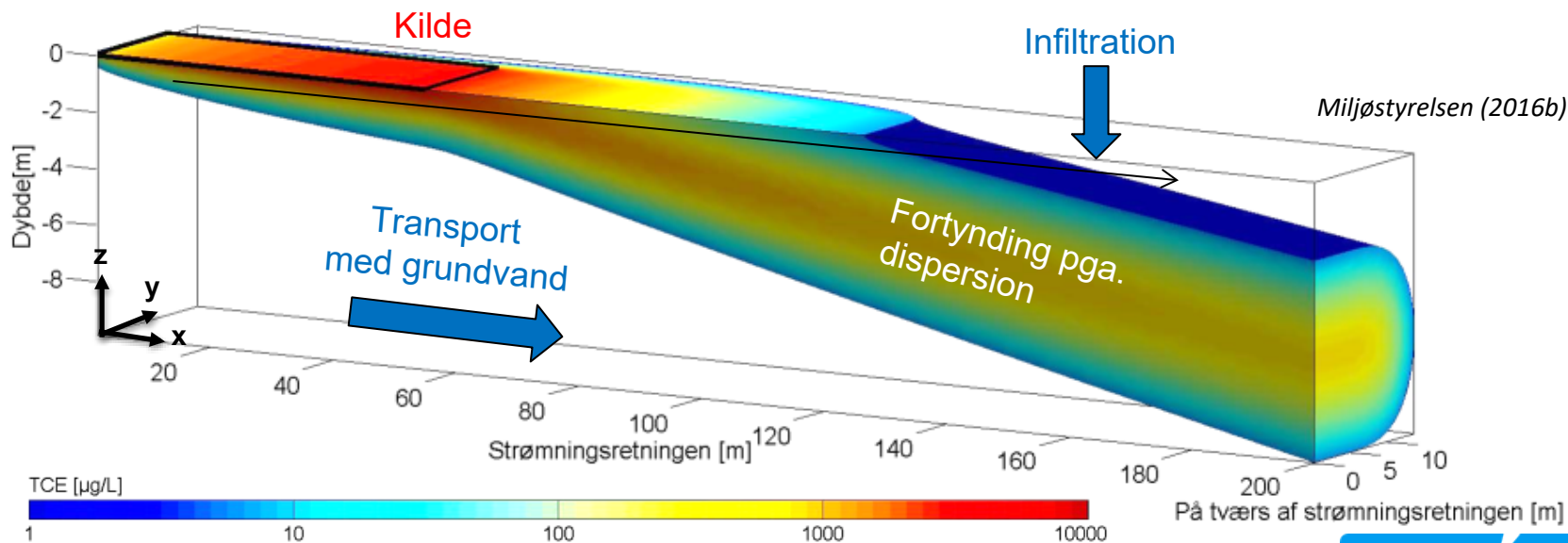
K : Hydraulisk konduktivitet af grundvandsmagasinet (m/s)

i : Den hydrauliske gradient i grundvandsmagasinet (-)

n : Porøsiteten af grundvandsmagasinet (-)

Dispersion i grundvandet beskrives i 3D

- Dispersion betegner den udspredning af forureningsfanen, der sker i et porøst medium som følge af variationen i flowhastigheden på både poreskala og akviferskala. Modellen inddrager dispersion i grundvandet i alle tre dimensioner:
 - **Longitudinal dispersion** beskriver udspreddingen i x-retningen (med grundvandets strømningsretning).
 - **Transversal dispersion** betegner udspreddingen i y-retningen (på tværs af strømningsretningen).
 - **Vertikal dispersion** betegner udspreddingen i z-retningen (over dybden).



Dispersion

- GrundRisk anvender følgende default værdier for de tre dispersiviteter, baseret på et litteraturstudie udført af DTU (Miljøstyrelsen 2016b):

Longitudinal
dispersivitet $\alpha_L = 1$ m

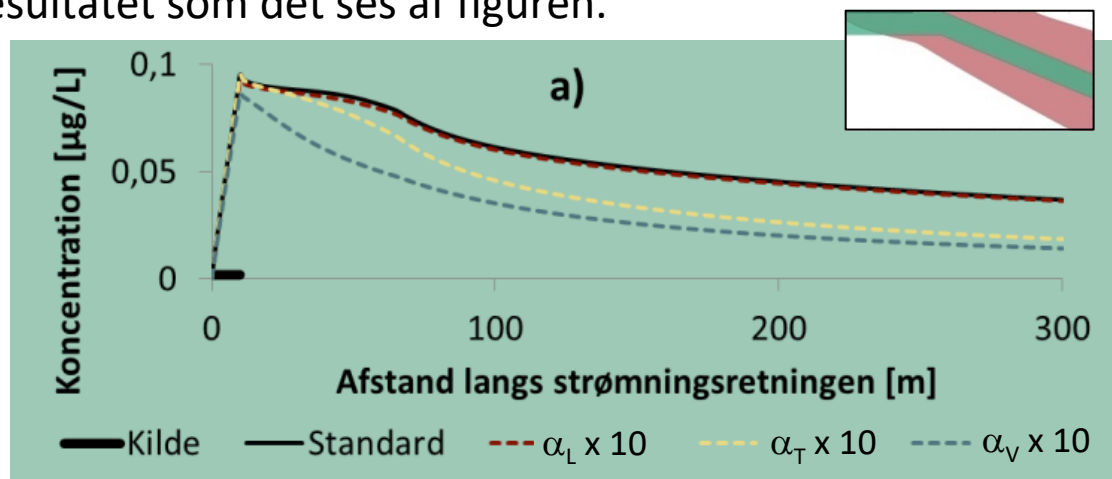
Transversal
dispersivitet $\alpha_T = 0,01$

Vertikal dispersivitet
 $\alpha_V = 0,005$

- Figuren nedenfor viser et eksempel på hvordan grundvandskoncentrationerne nedstrøms en forureningskilde påvirkes når hver af de tre dispersiviteter øges med en faktor 10.
- Da GrundRisk er en stationær model, vil størrelsen af den longitudinale dispersivitet (α_L) være af mindre betydning for resultatet som det ses af figuren.

Figuren viser de modellerede koncentrationer i grundvandet som funktion af afstanden fra kilden ved brug af standarddispersiviteter samt ved enkeltvis at øge dispersiviteterne med en faktor 10. Koncentrationerne er midlet over en filterlængde på 2 m. Det ses, at koncentrationerne er mest sensitive over for den vertikale dispersivitet, og dernæst den transversale.

Miljøstyrelsen (2016b)



2D eller 3D model for dispersion i grundvandet

3D model

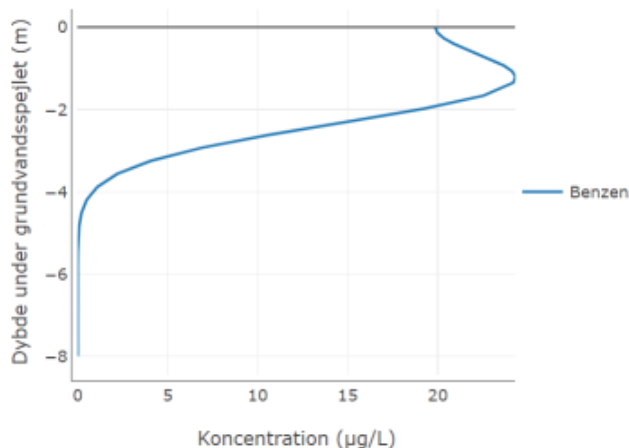
- Fanen kan spredes frit i alle 3 retninger i grundvandsmagasinet

2D model

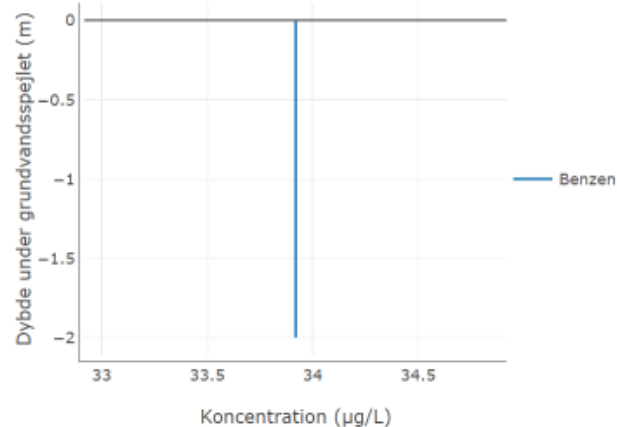
- Antager fuld opblanding over dybden. Dvs. koncentrationen i fanen er konstant over dybden for den nedstrøms afstand x , der kigges på.
- 2D modellen er relevant for grundvandsmagasiner med lille mægtighed, hvor fanen ikke kan sprede sig frit over dybden

GrundRisk-koden foretager altid en beregning både med 3D og 2D løsningen, men kun resultatet med den højeste koncentration vises

Eksempel 1: Koncentrationen over dybden for et magasin med en mægtighed på 10 m (resultat fra 3D model)



Eksempel 2: Koncentration over dybden for et magasin med en mægtighed på 2 m (resultat fra 2D model)





Sorption

- Opløste stoffer vil kunne binde sig til jorden ved sorption.
- Fordelingskoefficienten, K_d , beskriver hvordan et forureningsstof ved ligevægt fordeler sig mellem den faste og opløste fase under antagelse om lineær sorption:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w}$$

C_s : Koncentration i den faste fase (mg/kg)

C_w : Koncentration i vandfasen (mg/l)

- Sorptionen fører til en reduktion af forureningsfrontens hastighed, som kan beskrives ved retardationsfaktoren R :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d$$

ρ_b : bulkdensitet

n : vandfyldt porøsitet

- Forureningsfrontens gennemsnitlige hastighed v_s :

$$v_s = \frac{u}{R}$$

u : grundvandets hastighed



Stationær model

- GrundRisk modellen er en stationær model (steady state model) med en konstant kildekonzentration. Dvs. den beregner koncentrationen i et nedstrøms beregningspunkt under antagelse af, at der er sket fuldt gennembrud af forureningsfanen i punktet.
- Idet modellen er stationær har sorptionen ikke indflydelse på den beregnede koncentration i kontrolpunktet.
- Sorptionen har betydning for hvor lang tid det tager at opnå stationaritet. Den tid det tager at opnå den halve stationære koncentration ($C_{1/2}$) i et specifikt punkt i grundvandet kan estimeres ved:

$$t(C_{1/2}(x)) = \frac{x \cdot R}{u}$$

x : afstanden til beregningspunktet

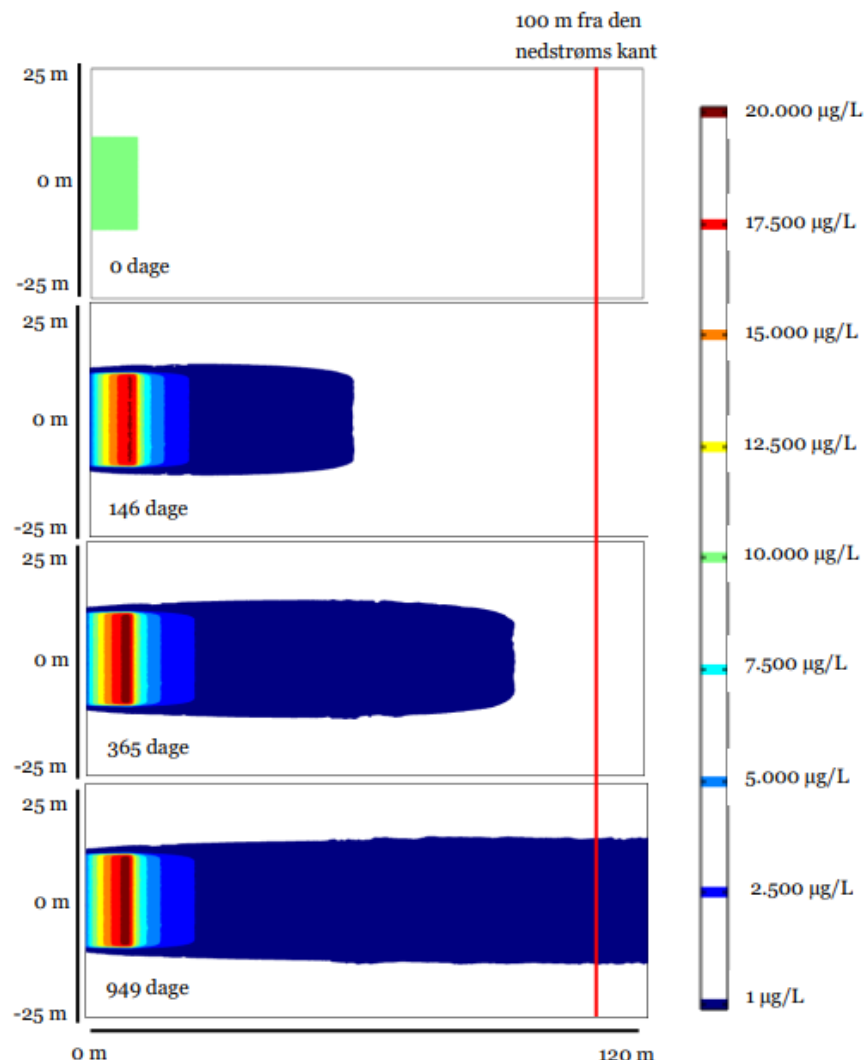
R : Forureningsstoffets retardationskoefficient

u : grundvandshastigheden

På lokaliteter hvor der endnu ikke er sket gennembrud af forureningen på undersøgelsestidspunktet, kan modellen estimere koncentrationerne i kontrolpunktet som er højere end dem der måles i grundvandet på lokaliteten. Det gælder specielt for lave grundvandshastigheder eller stærkt sorberende stoffer.

Hvornår er en forurening stationær?

- På figuren er der anvendt en transient model til beskrivelse af koncentrationen af benzen i grundvandet til fire forskellige tidspunkter
- Benzenforureningen bliver stationær i afstanden 100 m nedstrøms kilden godt 2,5 år fra start af modellering
- Dvs. der er sket fuldt gennembrud af forureningsfanen i kontrolpunktet.
- Koncentration i kontrolpunktet vil herefter ikke ændre sig over tid



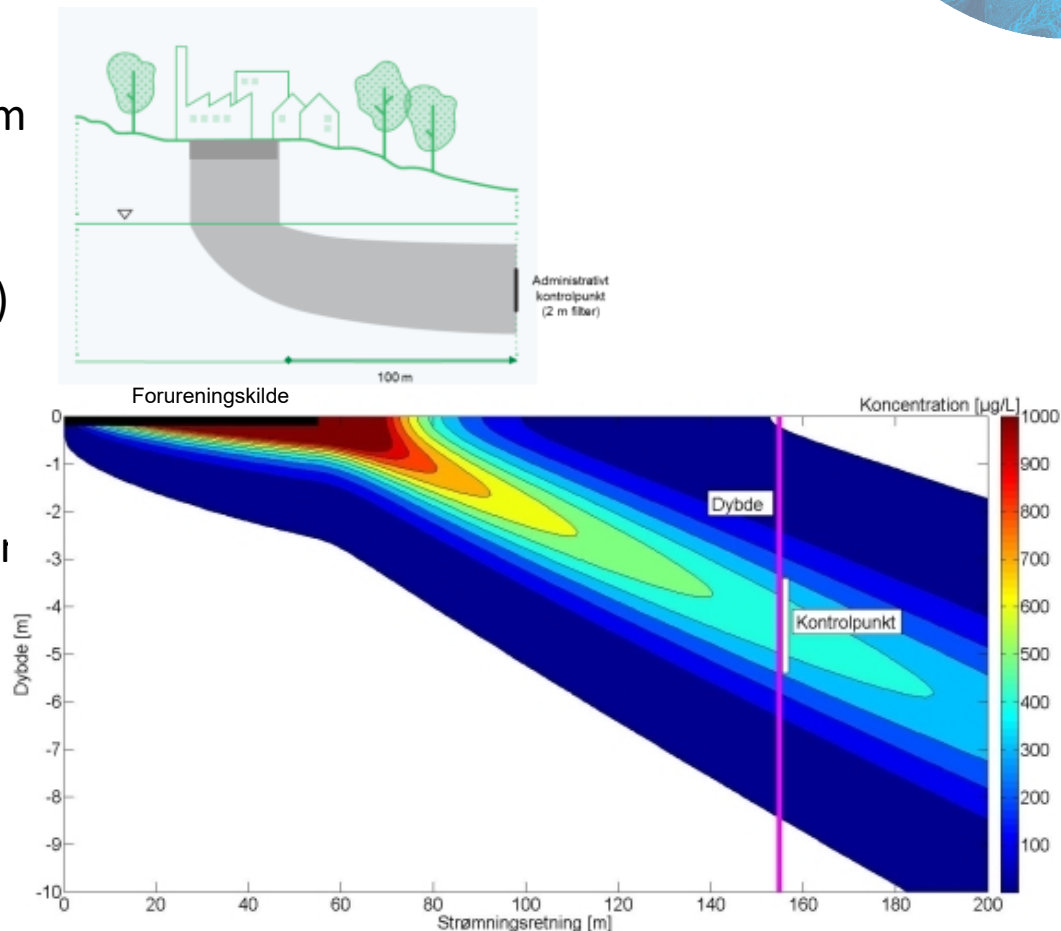
Plansnit der viser forureningsfanen set fra oven til 4 forskellige tidspunkter (0 dage, 146, dage, 365 dage og 949 dage) beregnet med en transient model. (Miljøstyrelsen, 2016b).

Kontrolpunkter

- Administrativt kontrolpunkt: 100 m nedstrøms kilde (2 meter filter)
- Ekstra kontrolpunkt kan tilvælges (afstand og filterlængde indtastes)

Midlet koncentration over filterlængde

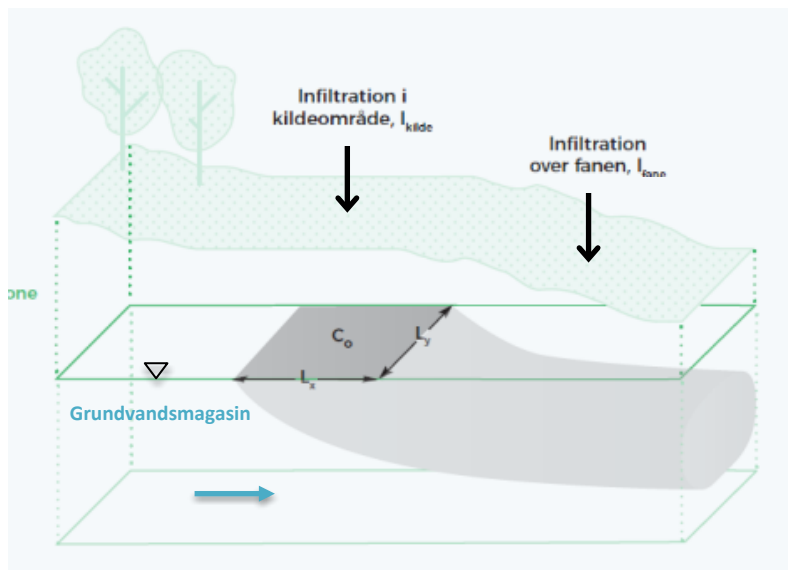
- Midten af filteret placeres i dybden med den højeste koncentration
- GrundRisk beregner en midlet koncentration langs den angivne filterlængde baseret på koncentrationen i 5 punkter



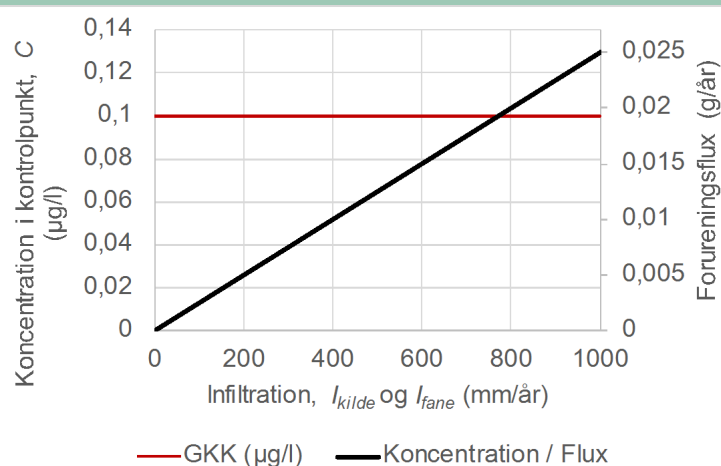
Figuren viser de modellerede koncentrationer over dybden i grundvandsmagasinet beregnet langs en strømlinje i midten af forureningsfanen. Koncentrationen i kontrolpunktet beregnes som en midlet koncentration over filterlængden der er placeret i dybden med de højeste koncentrationer (Miljøstyrelsen 2016b).

Betydning af infiltration i kildeområde I_{kilde}

- Har indflydelse på størrelsen af den vertikale forureningsflux J til grundvandet (undtagen i model 4), og er dermed også input til den horisontale beregning se figuren:
$$J = C \cdot I_{kilde} \cdot A$$
- Har betydning for opholdstiden i de vertikale modeller (undtagen model 4). Højere infiltration giver lavere opholdstid og dermed mindre nedbrydning i den vertikale del af modellen



Figuren viser hvordan koncentrationen og forureningsfluxen i kontrolpunktet stiger lineært med stigende infiltration. Eksemplet er beregnet med model 5. (Miljøstyrelsen, 2019).



Betydning af infiltration over fanen I_{fane}

- Får fanen til at dykke med afstanden fra kildeområdet og giver større udspredning (dispersion) over dybden
- Den afstand Z_i som fanen er trykket ned beskrives ved:

$$Z_i = \frac{I_{fane}(x - L_x)}{n \cdot u}$$

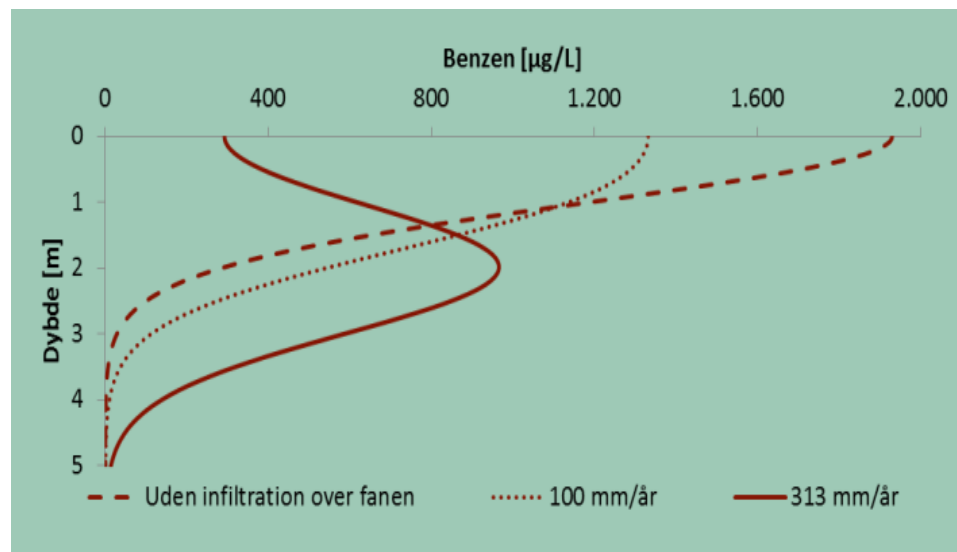
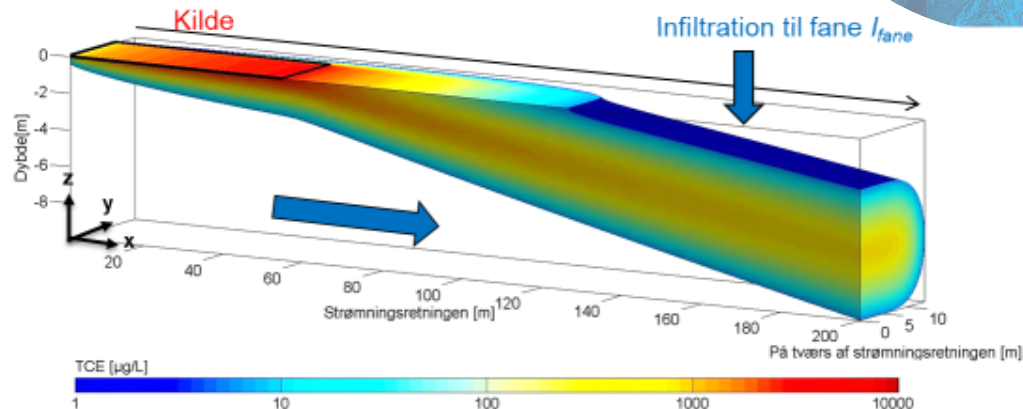
I_{fane} : Infiltrationen over fanen

x : afstanden til beregningspunktet fra den nedstrøms kant af forureningskilden

L_x : Længden af forureningskilden

n : porøsiteten af grundvandsmagasinet

u : grundvandshastigheden



Figuren viser de modellerede koncentrationer over dybden i et kontrolpunkt i grundvandsmagasinet ved tre forskellige størrelser af infiltrationen over fanen. (Miljøstyrelsen, 2016b).

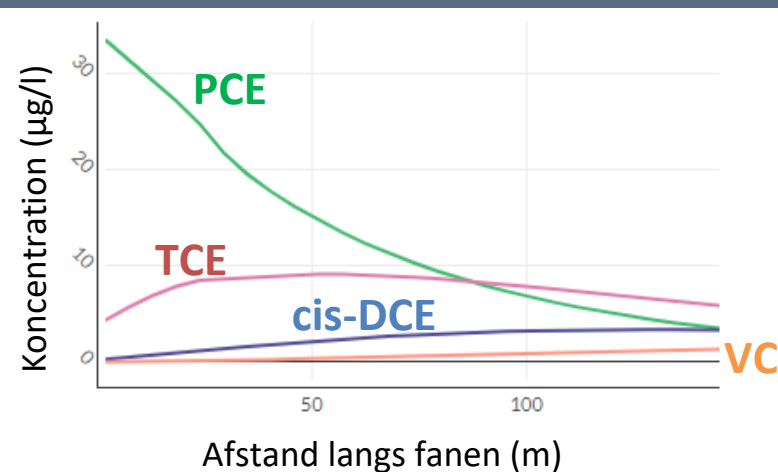
Nedbrydning

- Nedbrydning foregår udelukkende i vandfasen, ikke i den sorberede fase eller i luftfase

To typer af nedbrydning kan tilvælges

- 1. ordens nedbrydning
 - Nedbrydningen giver en 1. ordens fjernelse af stoffet
- 1. ordens sekventiel nedbrydning
 - Nedbrydningskæde med dannelse af nedbrydningsprodukter
 - Kan kun vælges for udvalgte stoffer, herunder chlorerede opløsningsmidler, visse pesticider og MTBE

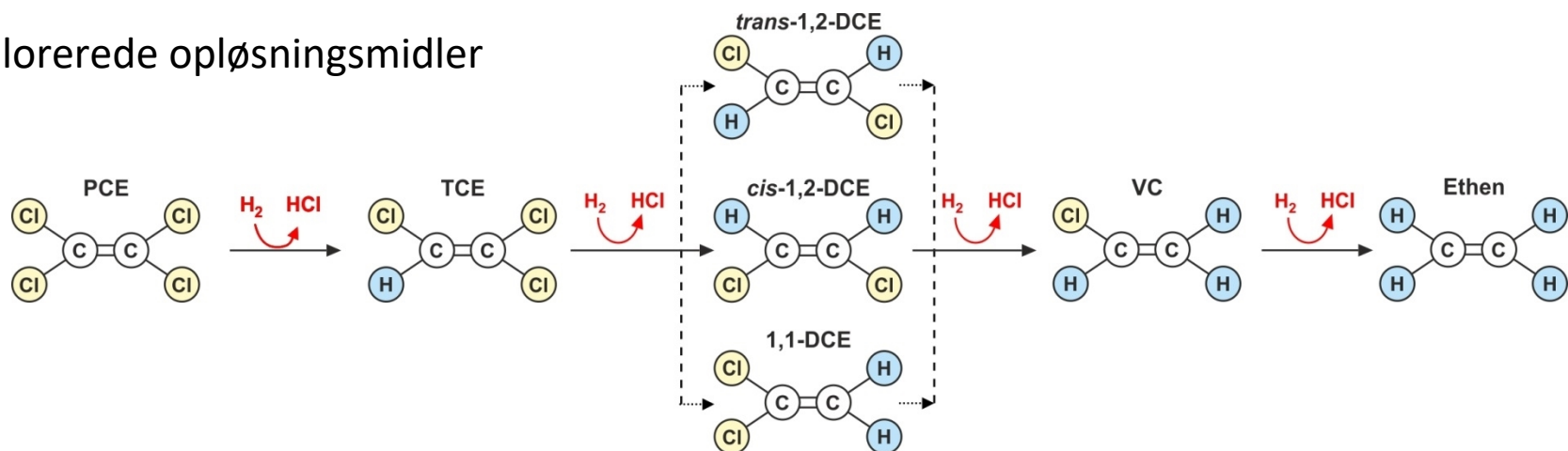
Sekventiel nedbrydning af PCE



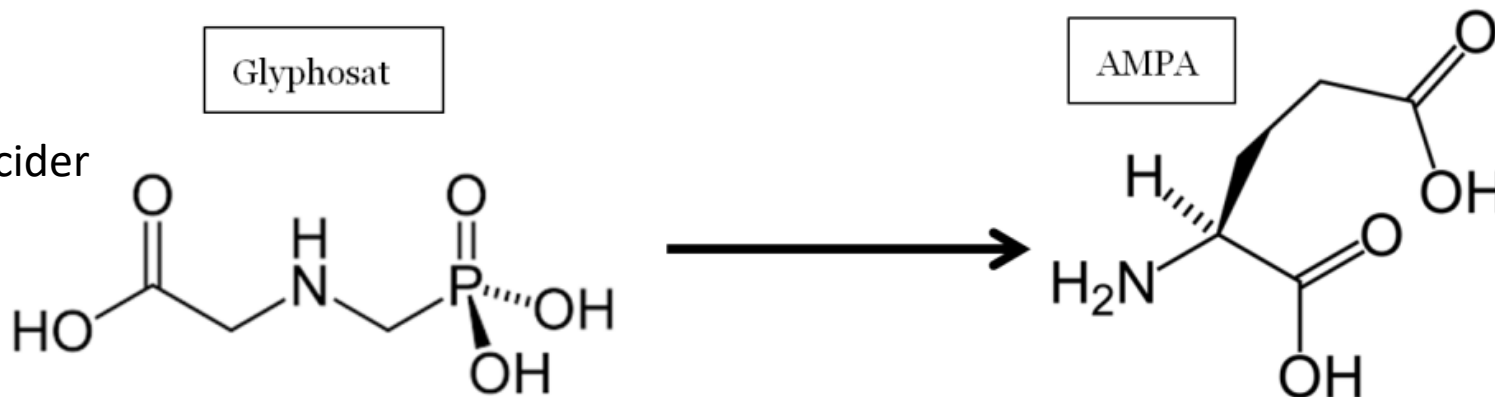
* Note til figuren. Vinylchlorid dannes ved nedbrydning af cis-DCE, og nedbrydes først derefter til ethen. Dannelsen af ethen er ikke tydelig på figuren.

Eksempler på sekventiel nedbrydning

Chlorerede opløsningsmidler



Pesticider





Oversigt over sekventielle nedbrydningsprocesser inkluderet i GrundRisk

Sekventielle nedbrydningsreaktioner inkluderet i GrundRisk	Kommentar
Forureningskilde	
<i>Chlorerede ethener</i> PCE → TCE → cis-DCE → VC → Ethen	Kræver anaerobe forhold
<i>Chlorerede ethaner</i> 1,1,1-TCA → 1,1-DCA → CA	Kræver anaerobe forhold
<i>Chlorerede metaner</i> Tetrachlormethan → Trichlormethan → Dichlormethan → Chlormethan	Kræver anaerobe forhold
Pesticider	
Dichlobenil → BAM	
Chloridazon → Desphenyl-chloridazon ¹⁾	
Glyphosat → AMPA	
Dichlorprop → 4-CPP ¹⁾	Kræver anaerobe forhold
Atrazin → Deethylatrazin ¹⁾	
Øvrige stoffer	
MTBE → TBA ¹⁾	

¹⁾ Der er flere mulige nedbrydningsveje og metabolitter, men disse er vurderet at være de dominerende metabolitter af Miljøstyrelsen (2018b).



Nedbrydningsrater

- Hvis nedbrydning tilvælges i GrundRisk er der som default indsat anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b):
 - Udvalgt som ”realistisk konservative” værdier
 - Udvalgt så de bedst muligt repræsenterer grundvand
 - De lavest fundne værdier er udvalgt med mindre studiet viste at højere rater er mest typiske for stoffet
 - Nedbrydningsraterne skal ikke bruges ukritisk, men baseres på en vurdering for den enkelte lokalitet.
 - Hvis der er datagrundlag for det, er der både fastsat en anbefalet nedbrydningsrate for aerobe og anaerobe forhold. Der kan i GrundRisk vælges, om den anbefalede aerobe eller anaerobe rate ønskes.
- Der er desuden intervaller i Miljøstyrelsen (2018b) som kan anvendes til følsomhedsberegninger og usikkerhedsvurderinger:
 - Minimum, maksimum og middelværdi samt anbefalet nedbrydningsrate.



Nedbrydning i de vertikale modeller

- Som default er de anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) indsat
- Bemærk: Sekventiel nedbrydning kan ikke vælges for den vertikale transport i model 3, 4 og 5 (se tabel herunder)

	Nedbrydning inkluderet i vertikal model		Nedbrydning inkluderet i horisontal model	
	1. ordens nedbrydning	Sekventiel nedbrydning	1. ordens nedbrydning	Sekventiel nedbrydning
Model 1. Homogen vandmættet ler	X	X	X	X
Model 2. Opsprækket vandmættet ler	X	X	X	X
Model 3. Umættet sand	X		X	X
Model 4. Umættet zone med impermeable overflade	X		X	X
Model 5. Forureningskilde lige over grundvandet			X	X



Parametre til forureningskilde

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Længde af kilde, L_x	m	Længde af kildeområde i grundvandets strømningsretning
Bredde af kilde, L_y	m	Bredde af kilde på tværs af grundvandets strømningsretning
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	Infiltration til grundvandet i kildeområdet
Infiltration over fanen I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen
Vertikal transport		
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	Afstanden fra bunden af kildeområdet og ned til toppen af grundvandsmagasinet
Porøsitet, ϵ	-	Porøsitet af dæklaget
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	En standardværdi på 0,1 m er indsat som defaultværdi
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Som udgangspunkt foreslås anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b). Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning

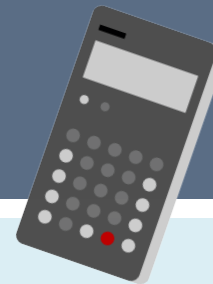
Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



3.2 Parametre til den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Horizontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D. Se slide 56 for yderligere forklaring.
Grundvandshastighed, u	m/år	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d ⁻¹	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over. Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_l	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
Vertikal dispersivitet α_v	m	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



3.3 Regneopgaver med tilhørende løsninger

Model 5 – forureningskilde lige over grundvandsmagasinet

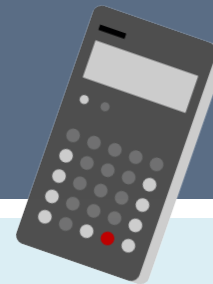
En lokalitet er forurennet med benzen. Forureningskilden ligger umiddelbart over et sandmagasin.

Parametre for forureningskilden

- Kildekoncentrationen af benzen er vurderet til 1000 $\mu\text{g/l}$ og kildeområdet er afgrænset til et areal med bredde 8 m og længde (i grundvandets strømningsretning) 15 m
- Infiltrationen i kildeområdet er vurderet til 200 mm/år. Det antages, at den samme infiltration er gældende for forureningsfanen

Parametre for horisontal transport

- Mægtigheden af grundvandsmagasinet er 20 m og magasinet består af sand med en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Porøsiteten sættes til 0,3, og den hydrauliske gradient i magasinet er 0,0025
- Der benyttes standardværdier (defaultværdier) for longitudinal, transversal og vertikal dispersivitet.
- Det antages at der ikke sker nedbrydning i grundvandsmagasinet
- **Kontrolpunkter**
- Der regnes på et kontrolpunkt 100 m nedstrøms med et 2 m filter. Indvindingsraten i den nedstrøms indvindingsboring sættes til $10.000 \text{ m}^3/\text{år}$



Regneopgaver med tilhørende løsninger

Model 5 – forureningskilde lige over grundvandsmagasinet

Resultaterne kan skrives i det tilhørende skema på næste slides

1. Basisscenarium Der foretages en beregning med GrundRisk (Model 5) med parametre som angivet på foregående slide. Beregn koncentrationen i kontrolpunktet 100 m nedstrøms samt i indvindingsboringen. Skriv dit resultat i tabellen.

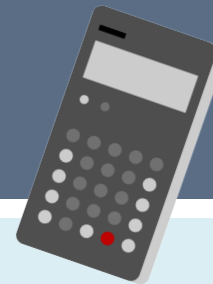
Tillægsspørgsmål : Se på grafen med koncentration over dybden i kontrolpunktet og besvar følgende:

Ved hvilken dybde under grundvandsspejlet opnås den højeste koncentration i grundvandet og hvad er den?

De følgende opgaver tager udgangspunkt i basisscenariet, idet der sker en ændring i forhold til basisscenariet som beskrevet. Herefter genberegnes resultaterne og tilføjes til oversigtstabellen. Sammenlign med basisscenariet og reflekter over resultatet.

2. Nedbrydningsrate Nedbrydningsraten for benzen sættes til $0,004 \text{ d}^{-1}$ hvilket svarer til den anbefalede anaerobe nedbrydningsrate i Miljøstyrelsen (2018b). Hvad betyder dette for koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen?

3. Kontrolpunkt (afstand) Afstanden til kontrolpunktet øges til 500 m (2 m filter), hvilken betydning har dette?



Regneopgaver med tilhørende løsninger

Model 5 – forureningskilde lige over grundvandsmagasinet

4. Kildebredde/Kildelængde Kilstørrelser er typisk meget usikre. Prøv med en bredde på 16 m. Tjek evt. betydningen af kildelængde/kildelængde.

5. Grundvandshastighed Hvilken betydning har grundvandshastigheden? Prøv med en hastighed der er dobbelt så stor som i basisscenariet

6. Infiltration Hvad betyder infiltrationens størrelse for resultatet? Prøv med en infiltration på 100 mm/år

7. 2D vs 3D Det primære grundvandsmagasin har en mægtighed på 20 m, og det betyder at fanen frit kan spredes over dybden, og det angivne resultat er en beregning der tager højde for dispersion i alle 3 dimensioner (3D). Hvis grundvandsmagasinet er tyndere, så er der fuld opblanding over hele magasinets tykkelse (dvs. ensartet koncentration over dybden). Prøv at sætte mægtigheden af magasinet til 1 m, og se hvad dette betyder for resultatet.



Resultatskema

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
1. Basisscenarium			
2. Nedbrydningsrate			
3. Kontrolpunkt (afstand)			
4. Kildebredde			
5. Grundvandshastighed			
6. Infiltration			
7. 2D vs 3D			



Løsninger

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
1. Basisscenarium	125 µg/l	2,4 µg/l	
2. Nedbrydningsrate	0,4 µg/l	0,009 µg/l	Øget nedbrydning → lavere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding
3. Kontrolpunkt (afstand)	52 µg/l	2,4 µg/l	Koncentrationen i indvindingen er uændret, da der ikke sker nedbrydning i grundvandsmagasinet. Fluxen er dermed den samme 500 m nedstrøms. Hvis nedbrydning var inkluderet i grundvandet ville koncentrationen stadig være uændret, da modellen kun inkluderer nedbrydning i de første 100 m af grundvandsmagasinet.
4. Kildebredde	126 µg/l	4,8 µg/l	Lille effekt for koncentrationen i kontrolpunktet, da denne måles midt i fanen. Stor effekt på forureningsfluxen og dermed koncentrationen i indvindingen. Denne fordobles når bredden (og dermed kildearealet) fordobles.
5. Grundvandshastighed	69 µg/l	2,4 µg/l	Større grundvandshastighed giver større fortynding i grundvandsmagasinet, men påvirker ikke den samlede forureningsflux og dermed heller ikke koncentrationen i indvindingen.
6. Infiltration	69 µg/l	1,2 µg/l	En lavere infiltration giver en lavere forureningsflux til grundvandet og dermed lavere koncentration i kontrolpunkt og indvinding.
7. 2D vs 3D	378 µg/l	2,4 µg/l	Højere koncentration i kontrolpunktet, da forureningsfanens udbredelse nedadtil er begrænset. Fluxen er uændret, derfor er koncentrationen i indvindingsboringen også uændret.

Løsninger

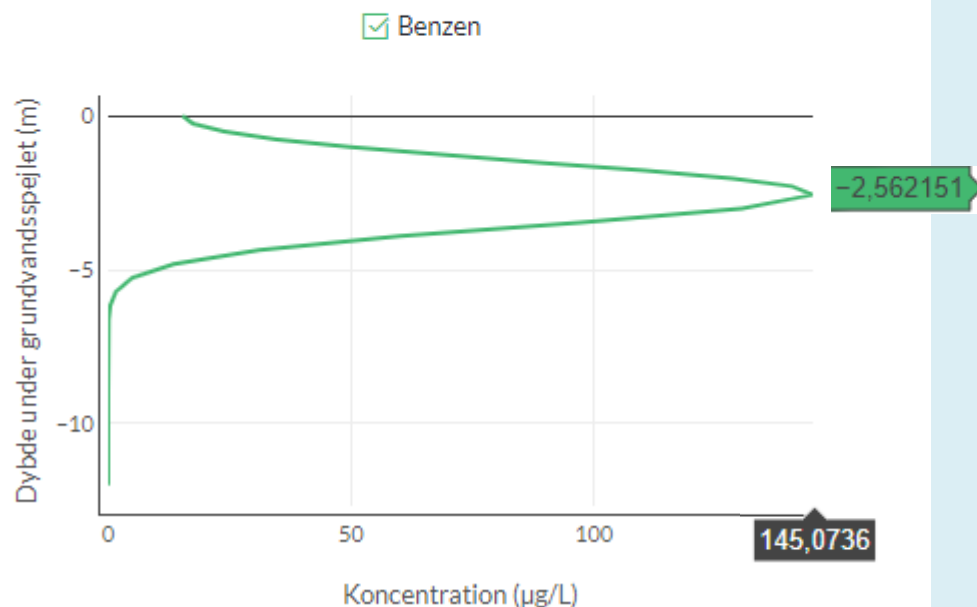
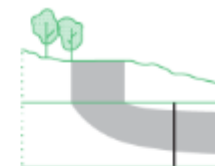
Tillægsspørgsmål

Svar:

Den højeste koncentration ses ca. 2,6 m under grundvandsspejlet og er på 145 µg/l, som det ses af figuren til højre.

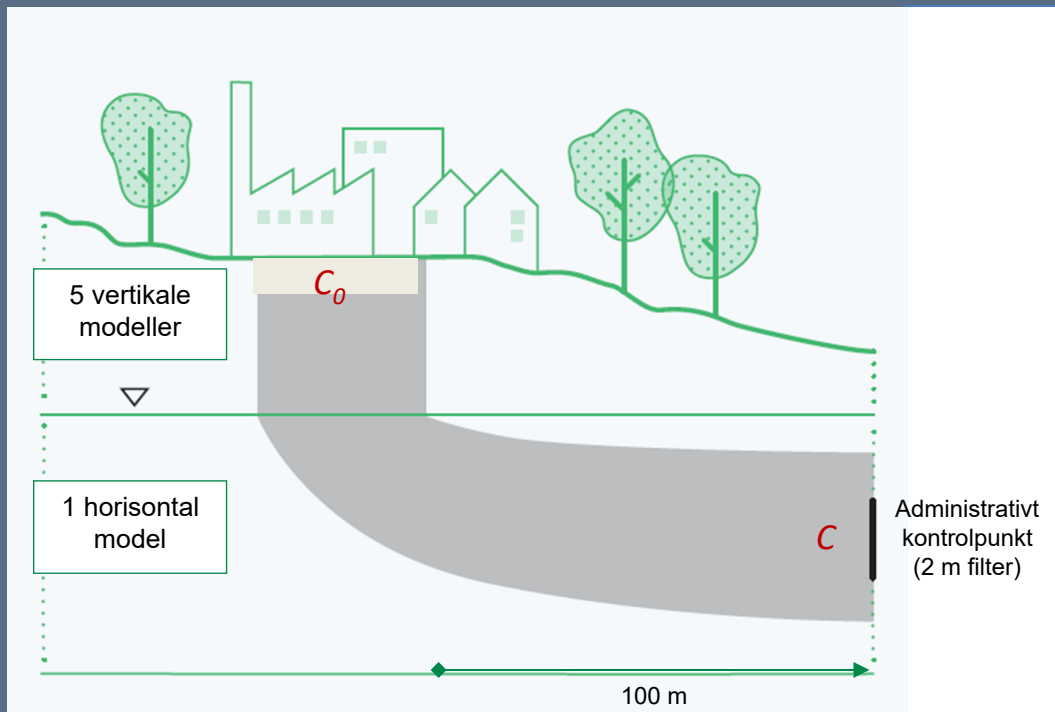
Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms

Figuren viser koncentrationens variation over dybden i en nedstrøms afstand svarende til det kontrolpunkt, der kigges på.





De fem vertikale modeller



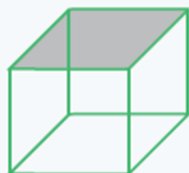
KAPITEL 4-8



De fem vertikale modeller

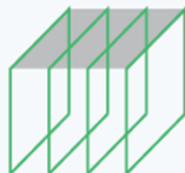
Mættet

Model 1



Homogen
vandmættet ler

Model 2



Vandmættet
opsprækket ler

Model 5



Forureningskilde lige over
grundvandsmagasinet

Umættet

Model 3

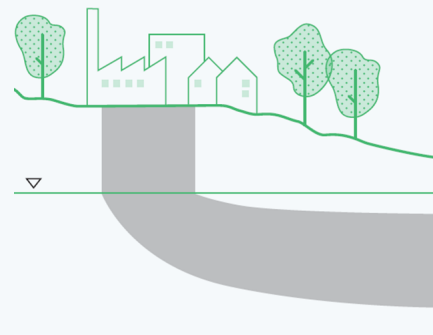


Umættet sand

Model 4



Umættet sand med
impermeabelt dæklag





Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

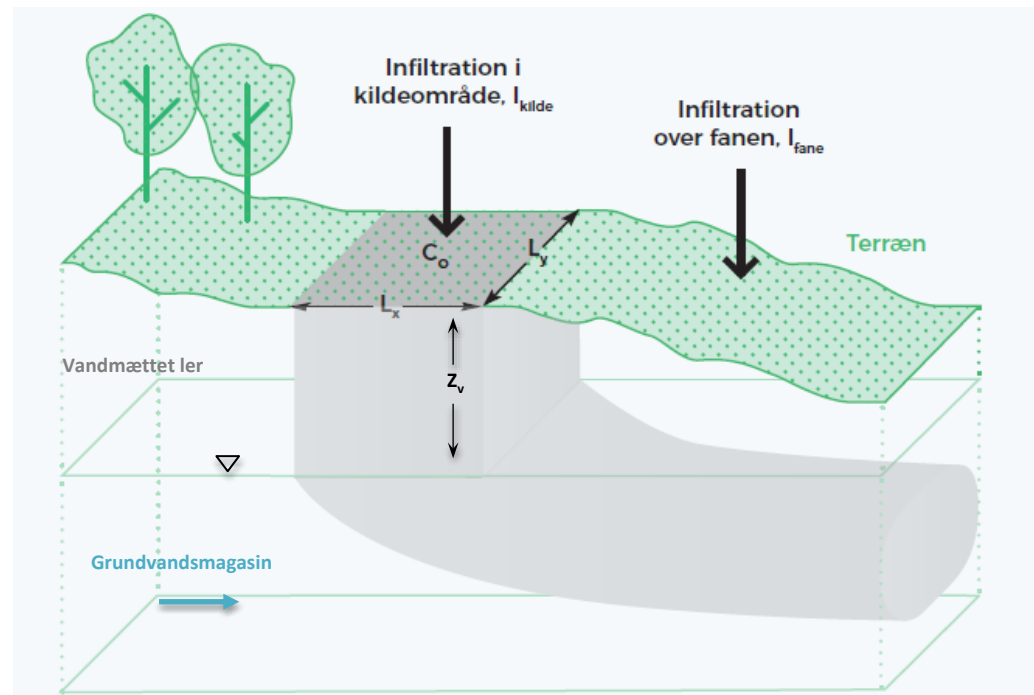
Model 1

Homogen vandmættet ler

KAPITEL 4

Model 1: Homogen vandmættet ler

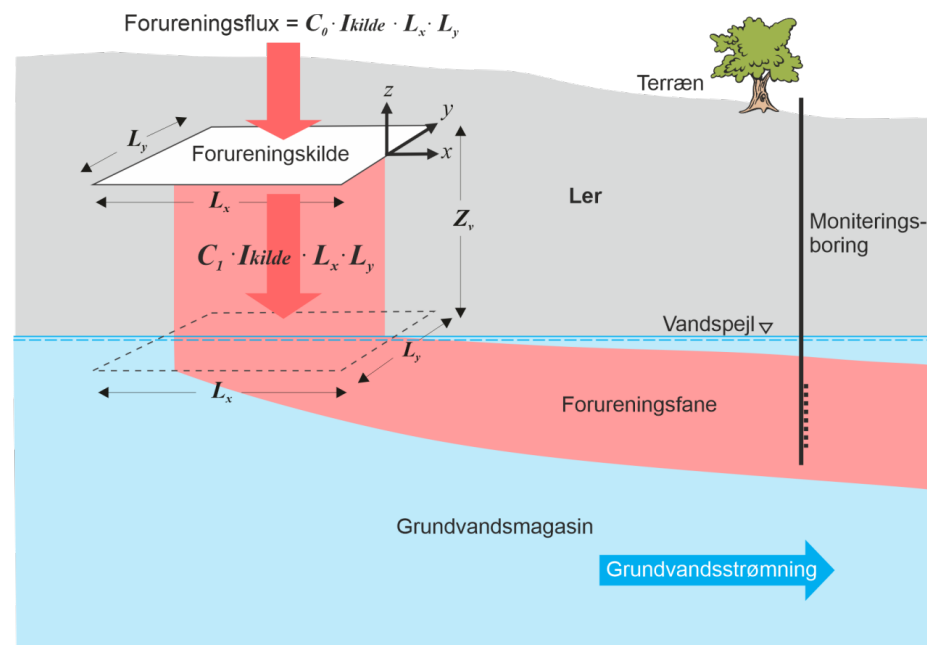
- Forureningskilde beliggende i eller over vandmættet ler uden sprækker
- Rektangulær forureningskilde med kildekonzentration C_o , længde L_x og bredde L_y
- Z_v angiver afstanden fra bunden af kildeområdet til toppen af grundvandsmagasinet



Model 1. Homogen vandmættet ler. Kildeområdet behøver ikke at være i niveau med terræn.

Model 1: Homogen vandmættet ler

- Kildekoncentrationen C_0 reduceres til C_1 under transporten til grundvandet som følge af nedbrydning i dæklaget
- Omfanget af nedbrydning afhænger især af nedbrydningsraten k_v , afstanden til grundvandet Z_v , porøsiteten ε og infiltrationen I_{kilde}
- Uden nedbrydning i dæklaget vil C_1 være lig med C_0 og det vil svare til at anvende model 5
- Der sker ikke horisontal udspredning af forureningen under transporten til grundvandet. Dvs. det forurenede areal ved toppen af grundvandsspejlet svarer til kildearealet



Model 1. Homogen vandmættet ler.

Figur baseret på Miljøstyrelsen (2017).

Model 1: Stoftransportligning

- Den vertikale transport i model 1 bygger på følgende stoftransportligning, som tager højde for lineær sorption, advektion, longitudinal dispersion og 1. ordens nedbrydning

$$R \frac{\partial C_w}{\partial t} = D_w \nabla^2 C_w - v \frac{\partial C_w}{\partial z} - \lambda C_w$$

Retardationsfaktor

Longitudinal dispersionskoefficient i z-retningen

Den vertikale porevands-hastighed

1. ordens nedbrydnings-rate

- Modellen inkl. den anvendte steady state løsning er yderligere beskrevet i Miljøstyrelsen (2017) og Miljøstyrelsen (2016a)



Model 1: Tips og tricks

- Den gennemsnitlige vertikale porevandshastighed v_z kan estimeres ud fra infiltrationen I_{kilde} og porøsiteten ε :

$$v_z = \frac{I_{kilde}}{\varepsilon}$$



Model 1: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Længde af kilde, L_x	m	Længde af kildeområde i grundvandets strømningsretning
Bredde af kilde, L_y	m	Bredde af kilde på tværs af grundvandets strømningsretning
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	Infiltration til grundvandet i kildeområdet
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen
Vertikal transport		
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	Afstanden fra bunden af kildeområdet og ned til toppen af grundvandsmagasinet
Porøsitet, ϵ	-	Porøsitet af dæklaget
Longitudinal dispersivitet, $\alpha_{L,v}$	m	En standardværdi på 0,1 m er indsat som defaultværdi
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Som udgangspunkt foreslås anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b). Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



Model 1: Parametre til den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Horisontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D
Grundvandshastighed, u	m/s	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d^{-1}	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over. Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
Vertikal dispersivitet α_V	m	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi

Ens for alle modeller

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterværdier



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler



Overordnede casekriterier

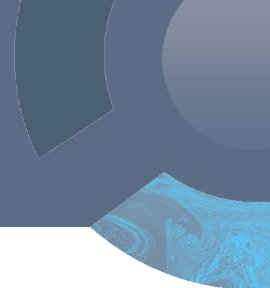
Cases for model 1-5

De fem cases er baseret på virkelige lokaliteter, der i enkelte tilfælde er tilpassede for at illustrere specifikke forhold.

Nedbrydning

Hvorvidt nedbrydning skal inkluderes ved risikovurderingen skal altid bygge på en faglig vurdering. Det er valgt at inkludere nedbrydning i alle fem cases for at:

- Illustrere nedbrydningens betydning for stofkoncentration nedstrøms forureningskilden.
- Give en forståelse for, hvordan de andre parametre i GrundRisk påvirker omfanget af nedbrydningen.



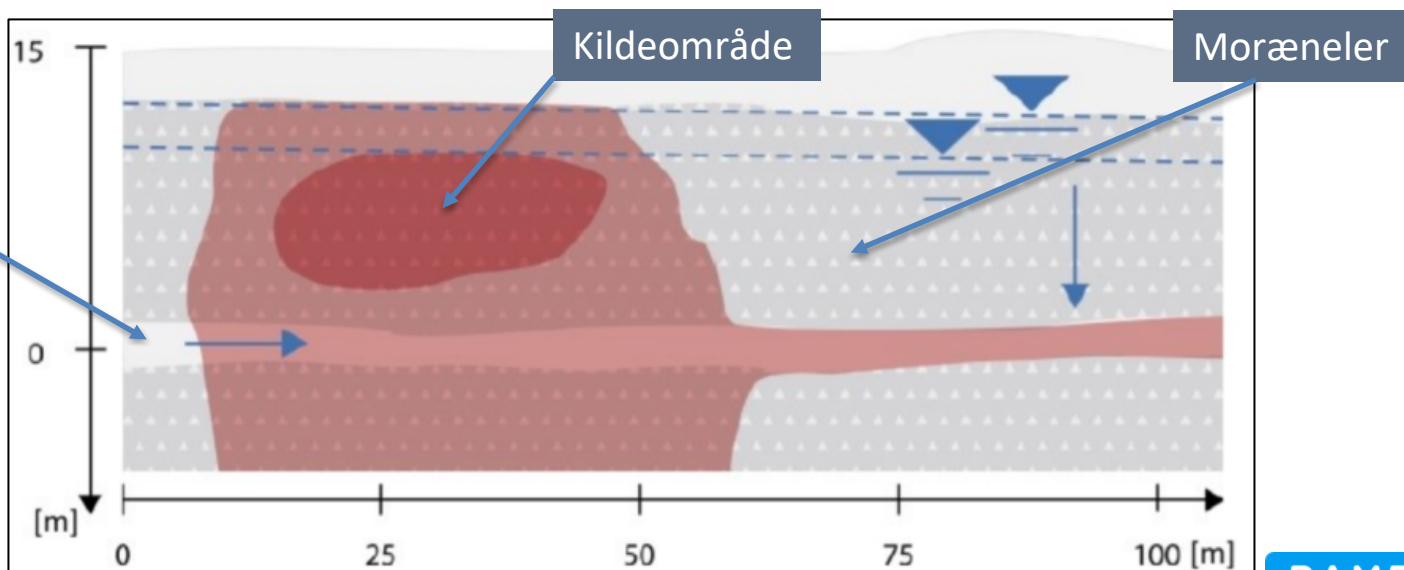
Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler

Geologi og grundvandsforhold

Det primære grundvandsmagasin i case-området består af smeltevandssand og -grus, og er overlejret af 25-30 m moræneler. Lokalt ses et ca. 1 meter tykt sekundært grundvandsmagasin bestående af fin-mellemkornet smeltevandssand 12 m.u.t., som er overlejret af fyld og moræneler.

Forurening

I case-området har været maskinfabrik frem til slutningen af 1980'erne, og forureningen består af benzen og toluen i et kildeområde med en længde på 30 m (langs grundvandsstrømningen) og en bredde på 10 m. Kilden estimeres beliggende 4-6 m.u.t., med kildekonzentrationer på 50 mg/l af hver af de to stoffer.

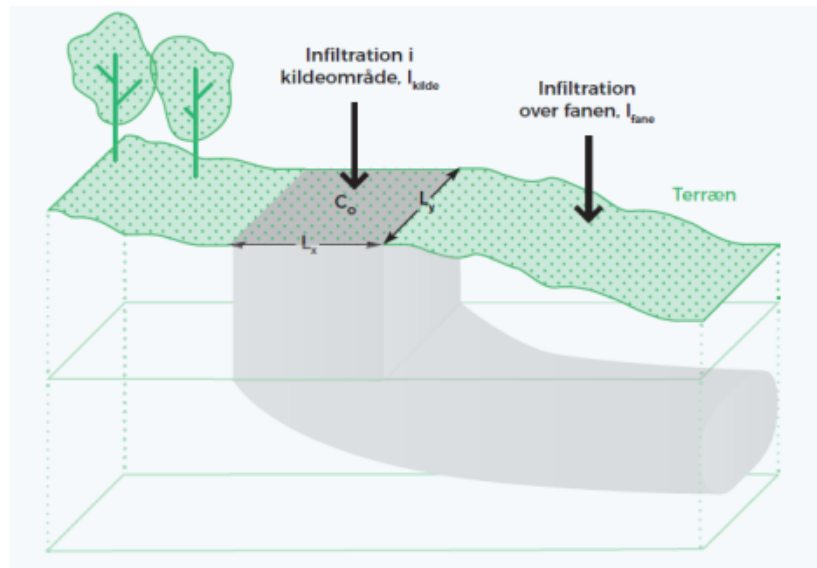




Case 1: BTEX forurening i vandmættet ler – Modelkørsel

Opstil en model for scenariet præsenteret i case 1

1. Vælg Model 1 i GrundRisk
2. Brug parametrene præsenteret i parameteroversigten på de følgende slides.



Konceptuel model af Model 1



Case 1: BTEX forurening i vandmættet ler – Parameteroversigt

Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Forureningskilde			
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Benzen: 50.000 Toluen: 50.000	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Længde af kilde, L_x	m	30	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Bredde af kilde, L_y	m	10	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	300	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	300	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Vertikal transport			
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	6	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Porøsitet, ϵ	-	0,35	Litteraturværdi baseret på jordtype
Longitudinal dispersivitet, $\alpha_{L,v}$	m	0,1	GrundRisk standardværdi er anvendt
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Benzen: 0,004 Toluen: 0,004	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)



Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler – Parameteroversigt 2

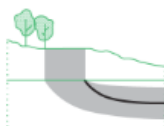
Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Horisontal transport			
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	1	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grundvandshastighed, u	m/år	126	Udregnet på baggrund af Darcy's lov, hvor parametrene er fundet ved feltundersøgelse
Porøsitet, n		0,25 (Kvartært sand)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	-	
Hydraulisk gradient, i		-	
1. ordens nedbrydningsrate, k	d ⁻¹	Benzen: 0,004 Toluen: 0,004	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	1	Standardværdi i GrundRisk
Transversal dispersivitet, α_T	m	0,01	Standardværdi i GrundRisk
Vertikal dispersivitet, α_V	m	0,005	Standardværdi i GrundRisk



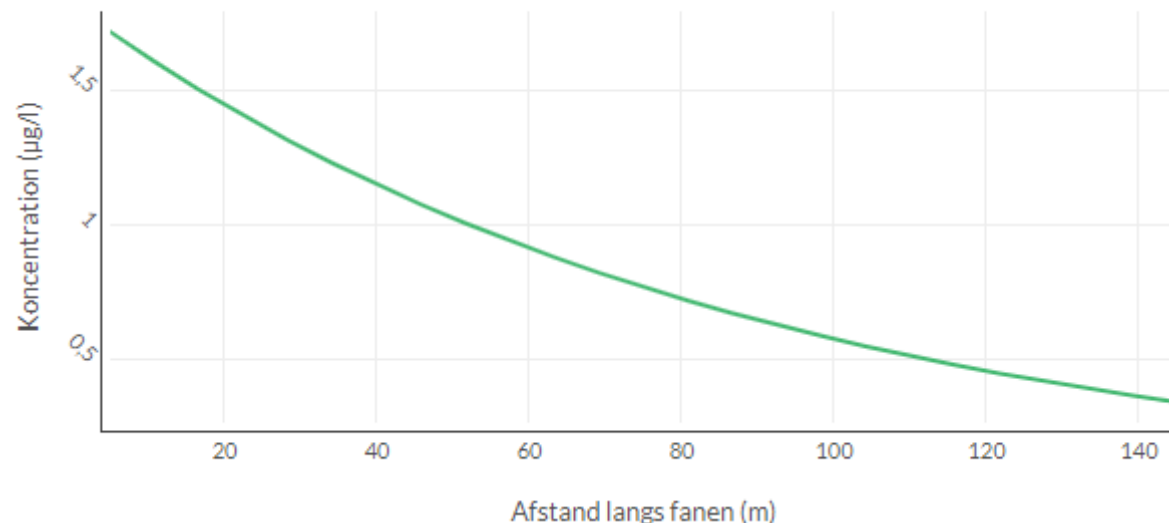
Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler – Modelresultater

Forureningsstof	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Risikovurdering	Kvalitetskriterie
Benzen:	0,58 µg/l	0,02 µg/l	Ingen risiko	1 µg/l
Toluen:	0,57 µg/l	0,02 µg/l	Ingen risiko	5 µg/l

Koncentration langs fanen



Benzen



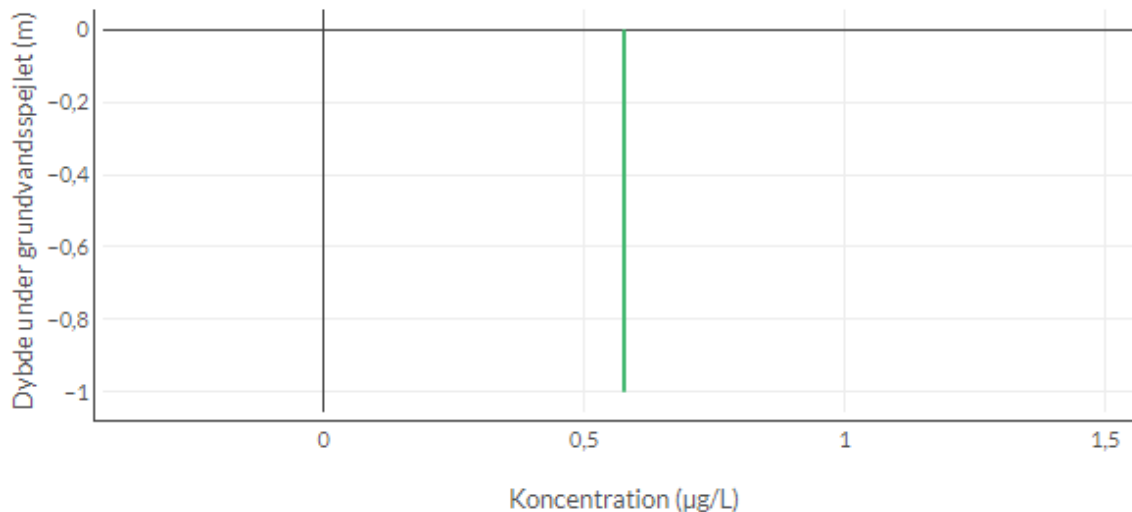
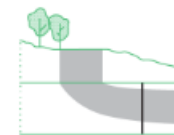
- De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over filterlængden.
- De er beregnet for dybderne med de højeste koncentrationer.
- Nulpunktet på x-aksen angiver placeringen af forureningskildens nedstrøms kant.
- Koncentration falder med afstanden grundet dispersion og nedbrydning under grundvandstransporten.



Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler – Modelresultater

Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms

Benzen

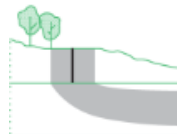


- Grafen viser koncentrationens variation over dybden i en nedstrøms afstand svarende til det valgte kontrolpunkt.
- Det smalle grundvandsmagasin (1 m) i dette scenarie medfører, at forureningsfanens udbredelse nedadtil er begrænset. Dette resulterer i en fuld opblanding over hele magasinets tykkelse (dvs. ensartet koncentration over dybden) og koncentrationen er beregnet vha. en 2D model.

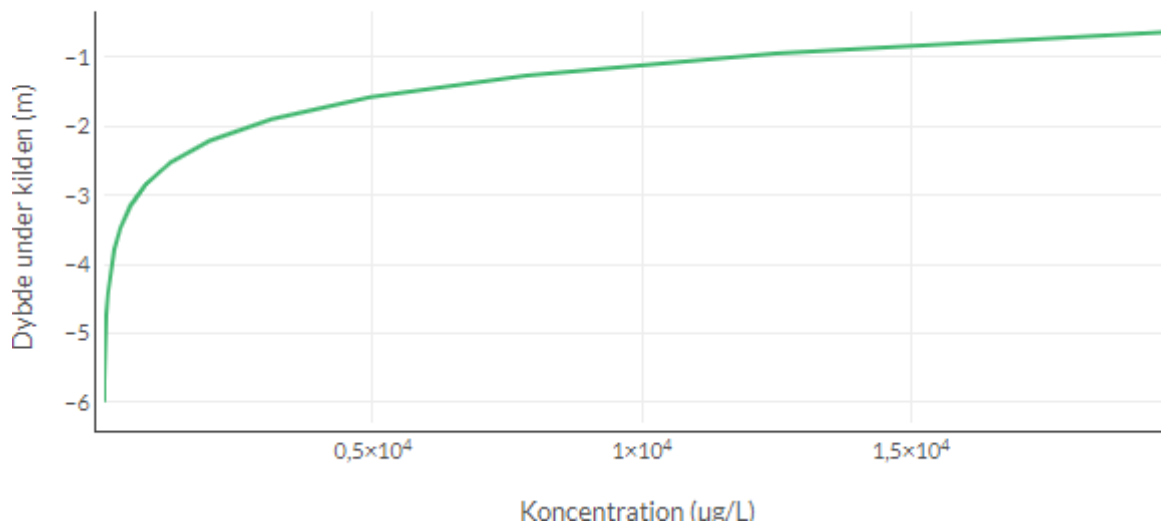


Case 1: BTEX-forurening i vandmættet ler – Modelresultater

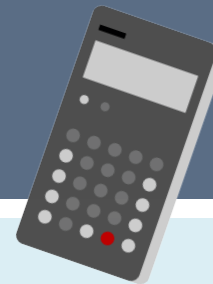
Koncentration over grundvandsspejlet



Benzen



- Grafen viser koncentrationens variation over dybden fra forureningskilden og ned til toppen af grundvandsmagasinet.
- Koncentration falder eksponentielt som følge af 1. ordens nedbrydning.



Case 1: Regneopgave 1 med tilhørende løsninger

- *Tidsrammen før benzenforureningen når grundvandsmagasinet*

1.) Estimér den vertikale porevandshastighed v_z

Den estimeres ud fra infiltrationen I_{kilde} og porøsiteten ε

2.) Estimér forureningsfrontens gennemsnitlige hastighed, v_s

Forureningsstofferne kan blive tilbageholdt i jorden på grund af bl.a. sorption.

Dette vil forårsage en reduktion af forureningsfrontens gennemsnitlige hastighed i forhold til porevandshastigheden. Estimér forureningsens vertikale hastighed. Der kan anvendes en k_d -værdi for benzen på 0,24 og bulkdensitet af moræneleren på 1,7 kg/L i beregningen.

3.) Estimér tidsrammen før benzen når grundvandsmagasinet

Estimér benzens opholdstid i moræneleren, dvs. den tid det tager for forureningsfronten at bevæge sig fra bunden af forureningskilden til toppen af grundvandsmagasinet.



Case 1: Regneopgave 1 løsning

-Tidsrammen før Benzen forureningen når grundvandsmagasinet

1) Vertikale porevandshastighed, v_z

$$v_z = \frac{I_{kilde}}{\varepsilon} \quad v_z = 0,86 \text{ m/år}$$

2) Forureningsfrontens hastighed, v_s

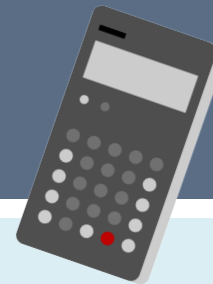
Retardationsfaktor, R :

$$R = 1 + \frac{\rho_b \cdot K_d}{\varepsilon} \quad R = 2,2$$

$$v_s = \frac{v_z}{R} \quad v_s = 0,4 \text{ m/år}$$

3) Tidsrammen før benzen når grundvandsmagasinet, t

$$t = \frac{z_v}{v_s} \quad t = 15 \text{ år}$$



Case 1: Parameterforståelse

Undersøg hvorledes ændringen af udvalgte parametre, præsenteret i de grå bokse, påvirker koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen.

Tag udgangspunkt i den model, der blev opstillet for case 1 (Basisscenarium). Undersøg kun i forhold til benzenkoncentration.

Indtast modelresultaterne i det tilhørende skema på næste slide og reflekter over resultatet.

Nedbrydning

Undersøg påvirkningen af lavere nedbrydningsrate under den vertikale transport.

Vælg $0,0002 d^{-1}$ der er den laveste nedbrydningsrate for Benzen angivet i GrundRisk

Mægtighed af grundvandsmagasinet

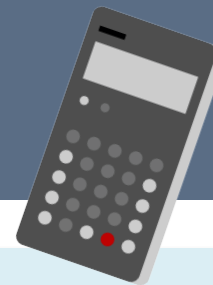
Undersøg betydningen af et tykkere grundvandsmagasin

Vælg 5 m i stedet for de 1 m

Jordtype (porøsitet)

Undersøg betydningen af valget af lertype i dæklaget, dette har betydning for porøsiteten.

Vælg en porøsitet på 0,25 svarende til en mere sandet lerjord



Case 1: Parameterforståelse - Resultatskema

Grundvandskvalitetskriterie (benzen): 1 µg/l

– Markér hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Refleksioner
Basisscenario	0,58 µg/l	0,02 µg/l	
Laveste nedbrydningsrate			
Øget dybde af grundvandsmagasinet			
Jordtype (porøsitet) Mere sandet ler (lavere porøsitet)			



Case 1: Parameterforståelse - Løsning

Grundvandskvalitetskriterie (benzen): 1 µg/l

– Hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Refleksioner
Basisscenarium	0,58 µg/l	0,02 µg/l	
Laveste nedbrydningsrate	2,3 µg/l	85 µg/l	Lavere nedbrydning → højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding.
Øget dybde af grundvandsmagasinet	0,24 µg/l	0,02 µg/l	Tykkere grundvandsmagasin → lavere koncentration i kontrolpunktet, da der i højere grad forekommer en udbredelse af forureningsfanen nedadtil. Fluxen er uændret, derfor er koncentrationen i indvindingsboringen også uændret.
Jordtype (porøsitet) Mere sandet ler (lavere porøsitet)	5,4 µg/l	0,2 µg/l	Lavere porøsitet → højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding, da opholdstiden er mindsket hvilket betyder kortere tid hvor der forekommer nedbrydning.



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

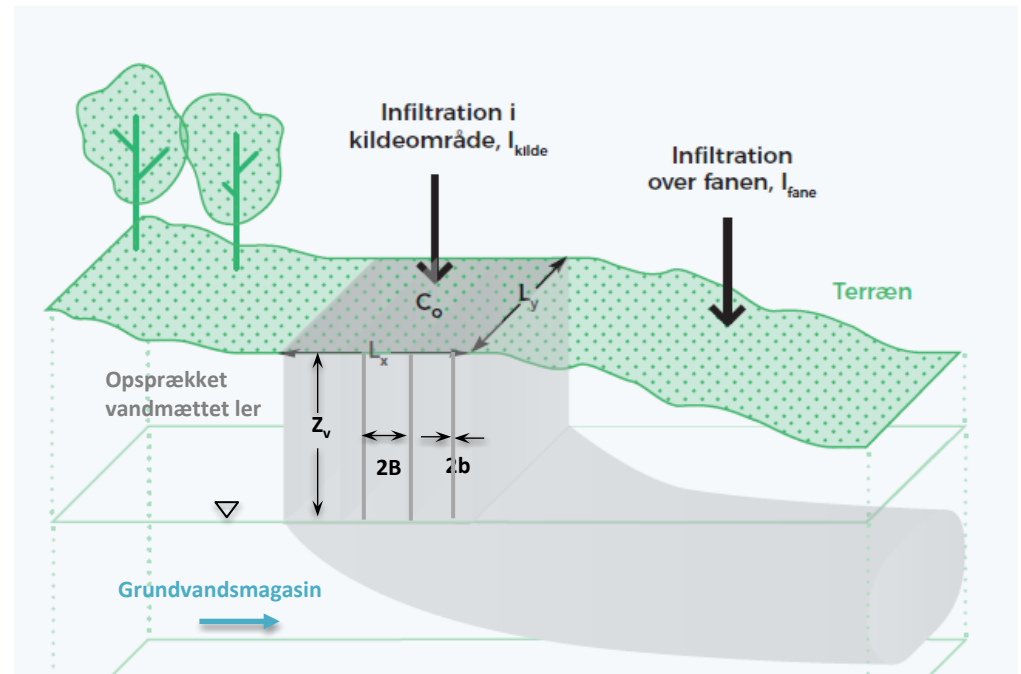
Model 2

Vandmættet opsprækket ler

KAPITEL 5

Model 2: Vandmættet opsprækket ler

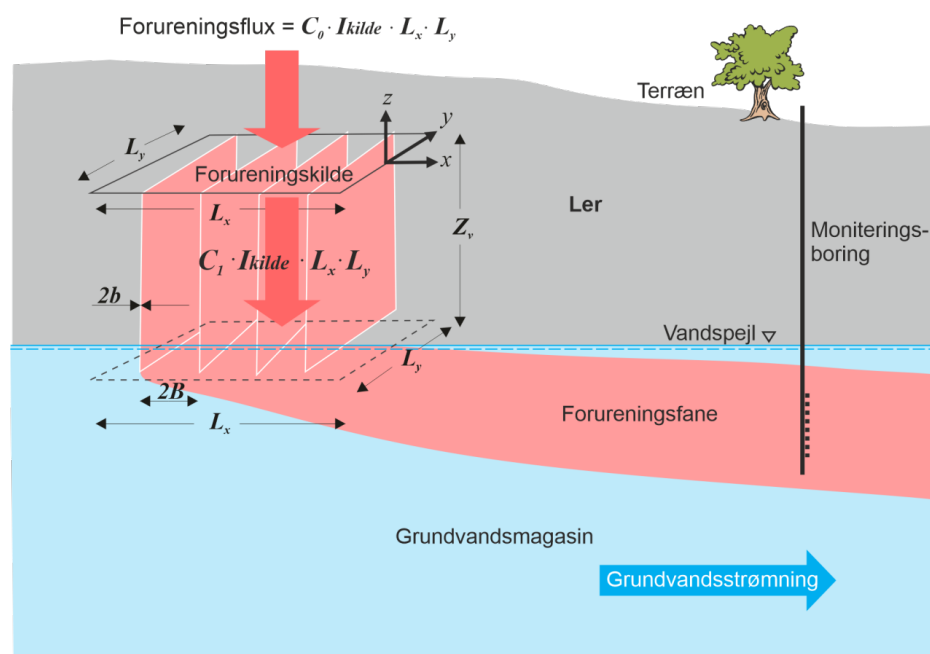
- Forureningskilde beliggende i eller over vandmættet ler med gennemgående sprækker
- Rektangulær forureningskilde med kildekonzentration C_o , længde L_x og bredde L_y
- Forureningen transporteres til grundvandet via sprækkerne
- Forureningstransport ind og ud af lermatricen antages alene at ske ved diffusion



Model 2. Vandmættet opsprækket ler. Z_v angiver afstanden fra bunden af kildeområdet til toppen af grundvandsmagasinet. Kildeområdet behøver ikke at være i niveau med terræn. $2B$: sprækkeafstand; $2b$: sprækkeåbning

Model 2: Vandmættet opsprækket ler

- Kildekoncentrationen C_0 reduceres til C_1 under transporten til grundvandet som følge af nedbrydning
- Omfanget af nedbrydningen afhænger af nedbrydningsraten k_v , sprækkeafstanden $2B$, lerlagets tykkelse Z_v , og infiltrationen I_{kilde}
- Uden nedbrydning i dæklaget vil modellen svare til model 5
- Der sker ikke horisontal udspredding af forureningen under transporten til grundvandet



Model 2. Vandmættet opsprækket ler Figur baseret på Miljøstyrelsen (2017).

Model 2: Stoftransportligning

- Den vertikale transport i model 2 bygger på følgende stoftransportligning, som tager højde for lineær sorption, advektion og nedbrydning i sprækken, samt udveksling af masseflux mellem lermatrix og sprække som følge af diffusion. Der ses bort fra advektiv transport i lermatrixen.

$$R_f \frac{\partial C_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial C_f}{\partial z} + \frac{Q_m}{b} + \lambda C_f = 0$$

Retardationsfaktor for overfladen af sprækkerne

Vertikal hastighed i sprækken

Q_m : Masseflux-udveksling mellem lermatrix og sprække
 b : den halve sprækkeåbning

1. ordens nedbrydningsrate

- Modellen inkl. den anvendte steady state løsning er yderligere beskrevet i Miljøstyrelsen (2017), Miljøstyrelsen (2016a) og Chambon et al. (2011)



Model 2: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Længde af kilde, L_x	m	Længde af kildeområde i grundvandets strømningsretning
Bredde af kilde, L_y	m	Bredde af kilde på tværs af grundvandets strømningsretning
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	Infiltration til grundvandet i kildeområdet
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen.
Vertikal transport		
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	Afstanden fra bunden af kildeområdet og ned til toppen af grundvandsmagasinet
Porøsitet, ϵ	-	Porøsitet af dæklaget
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Som udgangspunkt foreslås anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b). Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Sprækkeafstand, $2B$	m	Den indbyrdes afstand mellem sprækkerne. Worst case værdi for reduceret ler indsat som standardværdi (Jørgensen et al., 2008).
Sprækkeapertur, $2b$ ¹⁾	m	Bredden af sprækken. Worst case værdi for reduceret ler indsat som standardværdi (Jørgensen et al., 2008).
Bulk hydraulisk konduktivitet, K_b ¹⁾	m/s	Samlet hydraulisk konduktivitet for opsprækket moræneler. Worst case værdi for reduceret ler indsat som standardværdi (Jørgensen et al., 2008).

¹⁾ Det er kun nødvendigt at indtaste en af parametrene $2b$ og K_b . I det den værdi, der ikke indtastes, vil blive beregnet ud fra $2B$ og den værdi, der indtastes.

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterværdier



Model 2: Parametre til den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Horisontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D
Grundvandshastighed, u	m/s	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet, n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d^{-1}	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over. Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_l	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet, α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
Vertikal dispersivitet, α_v	m	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi

Ens for alle modeller

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler



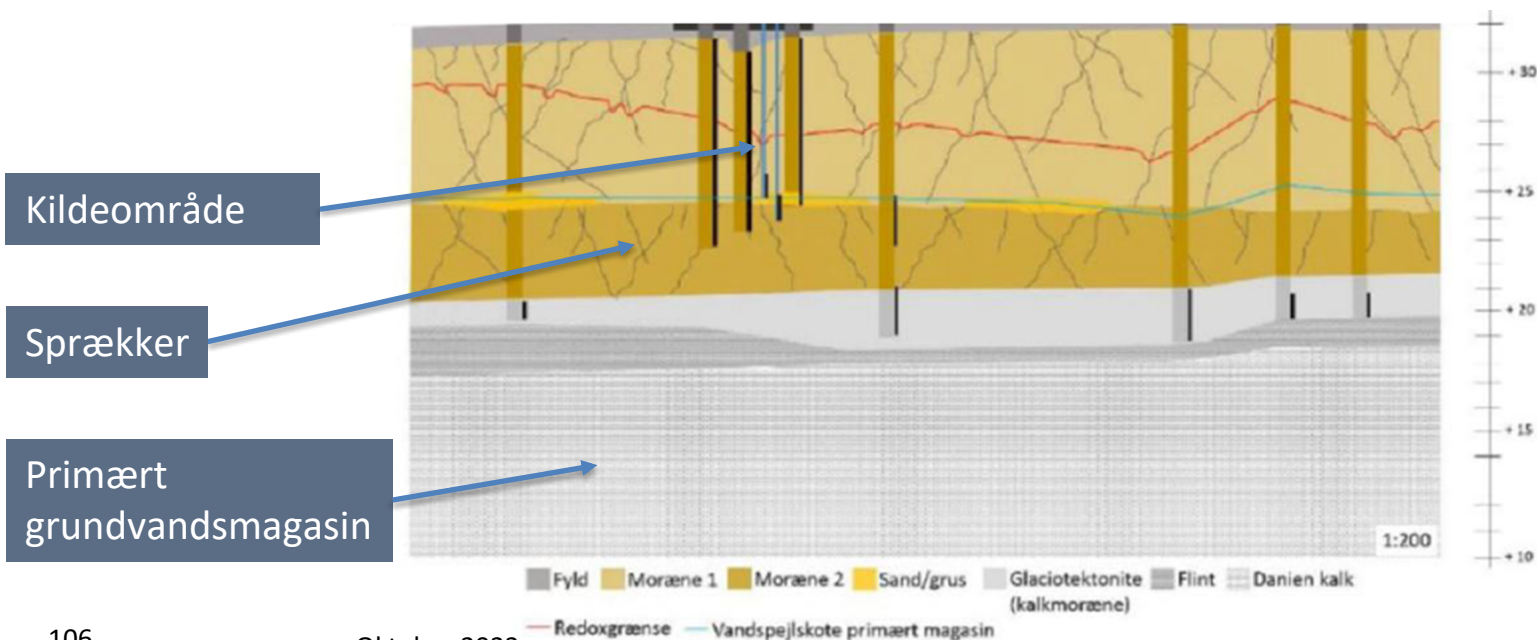
Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler

Geologi og grundvandsforhold

Geologien i case-området består af opsprækket moræneler indtil ca. 12 m.u.t., hvorunder der træffes 2-3 m kalkmoræne og flint overlejrende det primære grundvandsmagasin bestående af Danien kalk. I moræneleren træffes enkelte sandslirer, men der findes ikke et egentligt sekundært grundvandsmagasin.

Forurening

I case-området har en maskinstation forårsaget en forurening med dichlorprop og dets nedbrydningsprodukt 4-CPP. De højeste koncentrationer på 26 og 136 µg/l hhv. dichlorprop og 4-CPP er fundet ca. 5 m.u.t.

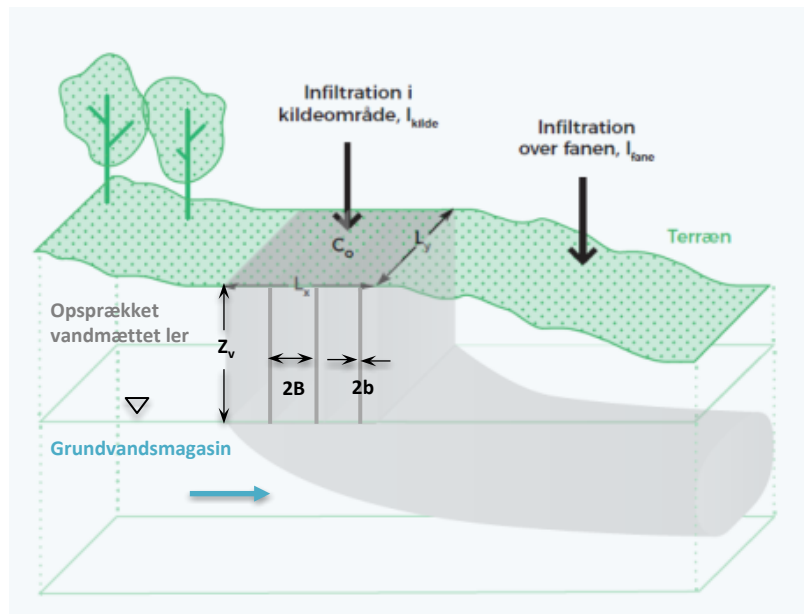




Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler – Modelkørsel

Opstil en model for scenariet præsenteret i case 2

1. Vælg Model 2 i GrundRisk
2. Brug parametrene præsenteret i parameteroversigten på de følgende slides.



Konceptuel model af Model 2



Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler

Parameteroversigt

Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Forureningskilde			
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Dichlorprop: 26 4-CPP: 136	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Længde af kilde, L_x	m	20	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Bredde af kilde, L_y	m	20	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	200	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	200	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Vertikal transport			
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	5	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Porøsitet, ϵ	-	0,25 (Moræneler)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Sekventiel (dichlorprop \rightarrow 4-CPP)	d^{-1}	Dichlorprop: 0,0005 4-CPP: 0,001	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)
Sprækkeafstand, $2B$	m	5	Worst case parameter for reduceret ler
Sprækkeapertur, $2b$ ¹⁾	m	$7,9 \cdot 10^{-5}$	Beregnet ud fra de andre input
Bulk hydraulisk konduktivitet, K_b ¹⁾	m/s	$6,3 \cdot 10^{-8}$	Worst case parameter for reduceret ler

¹⁾ Det er kun nødvendigt at indtaste én af parametrene $2b$ og K_b , idet den værdi, der ikke indtastes, vil blive beregnet ud fra $2B$ og den værdi, der indtastes.



Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler

Parameteroversigt 2

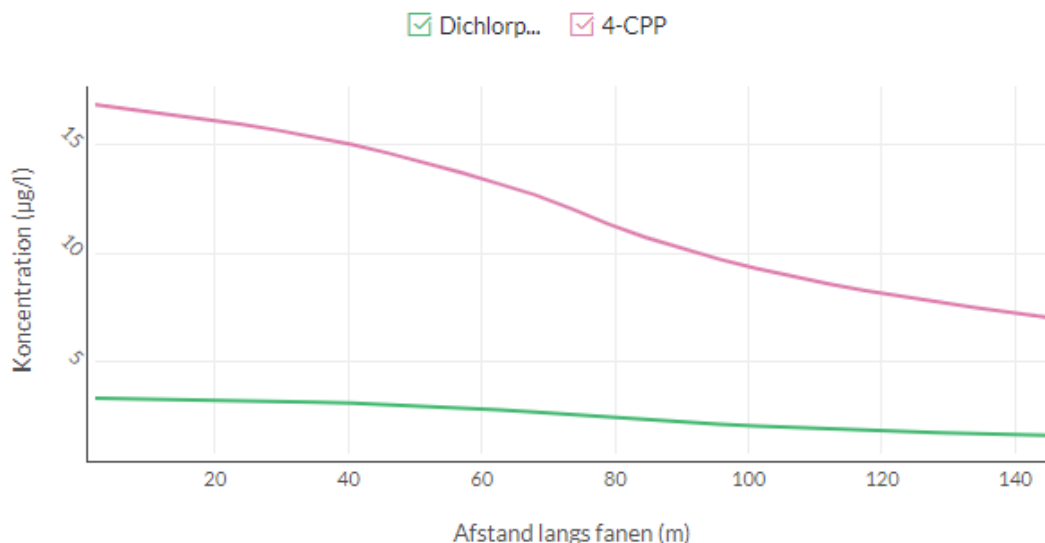
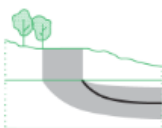
Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Horisontal transport			
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	5	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grundvandshastighed, u	m/år	142	GrundRisk beregning, hvor parametrene er fundet ved feltundersøgelse
Porøsitet, n		0,1 (Opsprækket kalk)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	$4 \cdot 10^{-4}$	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk gradient, i		0,001126	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Sekventiel (dichlorprop \rightarrow 4-CPP)	d^{-1}	Dichlorprop: 0,0005 4-CPP: 0,001	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	1	Standardværdi i GrundRisk
Transversal dispersivitet, α_T	m	0,01	Standardværdi i GrundRisk
Vertikal dispersivitet, α_V	m	0,005	Standardværdi i GrundRisk



Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler – modelresultater

Forureningsstof	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Risikovurdering	Kvalitetskriterie
Dichlorprop: 4-CPP:	2,1 µg/l 9,4 µg/l	0,17 µg/l 0,78 µg/l	Risiko Risiko	0,1 µg/l 0,1 µg/l

Koncentration langs fanen

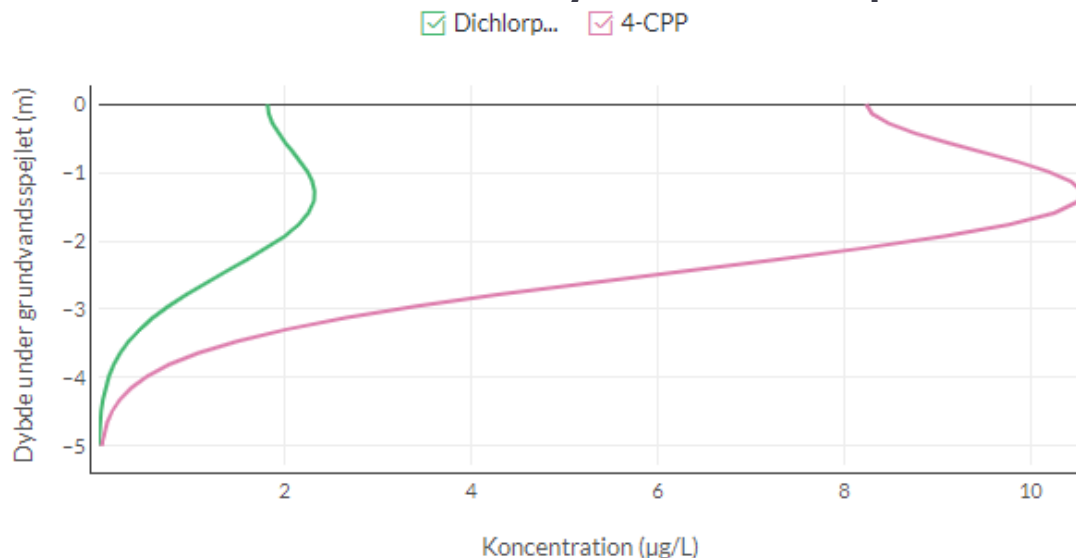


- De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over den valgte filterlængde.
- De er beregnet for dybderne med de højeste koncentrationer.
- Koncentration falder med afstanden grundet dispersion og nedbrydning under grundvandstransporten
- Koncentrationen af 4-CPP falder hurtigere end koncentrationen af Dichlorprop grundet en højere nedbrydningsrate for 4-CPP



Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler – modelresultater

Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms

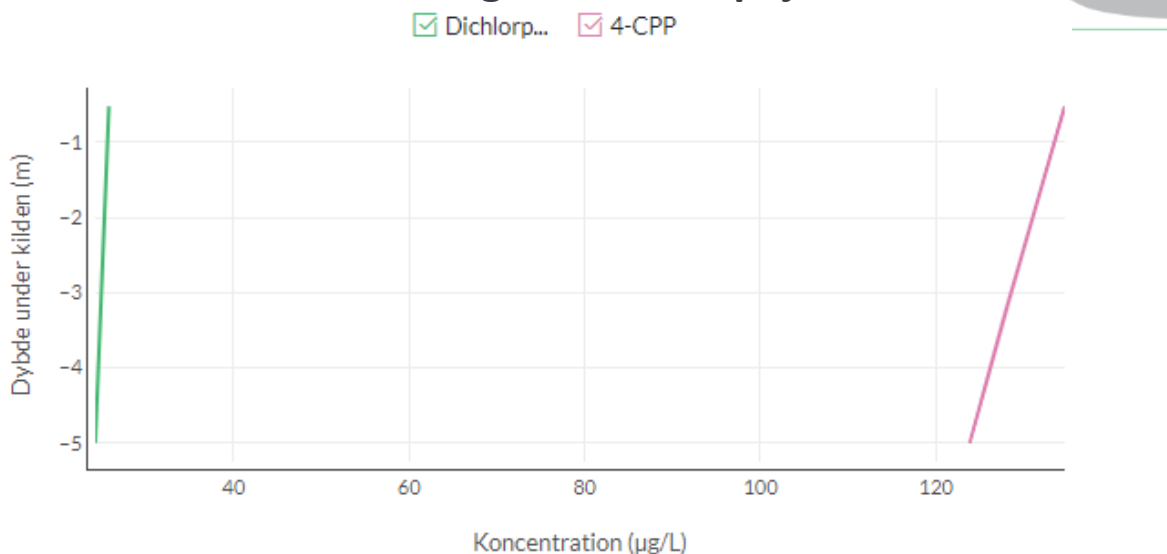


- Figuren viser koncentrationernes variation over dybden af grundvandsmagasinet for kontrolpunktet 100 m nedstrøms.
- Koncentrationerne i kontrolpunktet varierer over dybden som følge af dispersion og infiltration til forureningsfanen. I dette casescenarie kan fanen frit spredes over dybden med dispersion i alle 3 dimensioner. Det ses at forureningsfanen bliver trykket nedad på grund af infiltrationen, og de højeste koncentrationer i fanen ses derfor ikke lige under grundvandsspejlet.

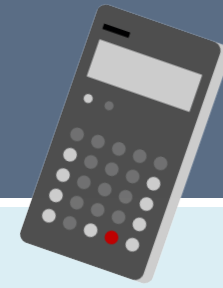


Case 2: Pesticid-forurening i vandmættet opsprækket ler – modelresultater

Koncentration over grundvandsspejlet



- Figuren viser variationen over dybden af dichlorprop og 4-CPP set fra forureningskilden og ned til grundvandsspejlet.
- Effekten af nedbrydning er i dette tilfælde mindre end i case 1. Dette skyldes den langt hurtigere vertikale vandhastighed i den opsprækkede moræneler samt lavere nedbrydningsrater for stofferne. Derudover dannes 4-CPP løbende som følge af den sekventielle nedbrydning.

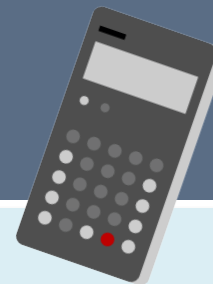


Case 2: Regneopgave 1 med tilhørende løsninger

- *Transporttid i sprækkerne*

Forureningen i model 2 transporteres vha. advektiv transport via sprækkerne til grundvandet

- 1) **Udregn vandets vertikale hastighed i sprækken v_f**
Den vertikale porevandshastighed i sprækken v_f er påvirket af morænelerets egenskaber.
 - i. Udregn v_f under antagelse af en sprækkeafstand $2B$ på hhv. 5 m og 1,5 m, sammenlign hastighederne og reflektér over resultatet.
 - ii. Tjek om den vertikale hydrauliske gradient, i , ligger inden for intervallet 0-1



Case 2: Regneopgave 1 - løsninger

Transporttid i sprækkerne

1 i) Vandets vertikale hastigheden i sprækken, v_f , kan estimeres ud fra ligningen:

$$v_f = \frac{2B \cdot K_b \cdot i}{2b}$$

Sprækkeafstand 2B på 5 m:

$$V_f = 12658 \text{ m/år}$$

Sprækkeafstand 2B på 1,5 m:

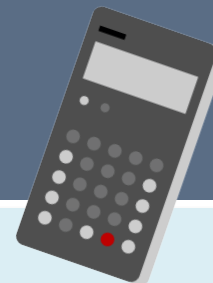
$$V_f = 3797 \text{ m/år}$$

Des flere sprækker der forekommer inden for et kildeområde, des mindre vand løber der igennem hver sprække, resulterende i en lavere vertikal vandhastighed.

1 ii) Den vertikale hydraulisk gradient, i , kan estimeres som:

$$i = \frac{I_{kilde}}{K_b} \quad i = 0,1$$

Den vertikale hydrologiske gradient ligger inden for intervallet 0-1.



Case 2: Parameterforståelse

Undersøg hvorledes ændringen af udvalgte parametre, præsenteret i de grå bokse, påvirker koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen.

Tag udgangspunkt i den model der blev opstillet for case 2 (Basisscenarium).

Indtast modelresultaterne i det tilhørende skema på næste slide og reflekter over resultatet.

Nedbrydning

Undersøg påvirkningen af en højere nedbrydningsrate for Dichlorprop under den vertikale transport.

Vælg $0,0035 d^{-1}$ for Dichlorprop der er den højeste angivet nedbrydningsrate i GrundRisk

Sprækkeafstanden, 2B

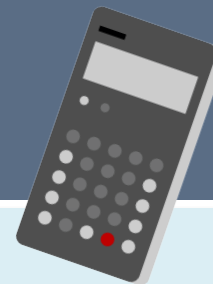
Undersøg betydningen af en mindre sprækkeafstand

Vælg 1,5 m der er den mindste anbefalede sprækkeafstand benyttet i model 2

Afstand fra kilden til grundvandet

Undersøg betydningen af en længere afstand fra kilden til grundvandsmagasinet.

Vælg en afstand på 15 m

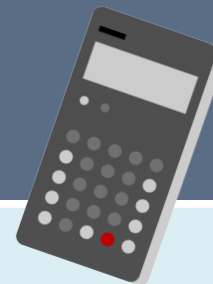


Case 2: Parameterforståelse - Resultatskema

Grundvandskvalitetskriterium (Dichlorprop og 4-CPP): 0,1 µg/l

– Markér hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Refleksioner
Basisscenarium Dichlorprop: 4-CPP:	2,1 µg/l 9,4 µg/l	0,17 µg/l 0,78 µg/l	
Højere nedbrydning for Dichlorprop Dichlorprop: 4-CPP:			
Mindre sprække- afstand Dichlorprop: 4-CPP:			
Længere afstand fra kilden til grundvandet Dichlorprop: 4-CPP:			



Case 2: Parameterforståelse - Løsning

Grundvandskvalitetskriterium (Dichlorprop og 4-CPP): 0,1 µg/l

– Hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Refleksioner
Basisscenarium Dichlorprop: 4-CPP:	2,1 µg/l 9,4 µg/l	0,17 µg/l 0,78 µg/l	
Højere nedbrydning for Dichlorprop Dichlorprop: 4-CPP:	1,9 µg/l 9,5 µg/l	0,15 µg/l 0,79 µg/l	Højere nedbrydning → lavere koncentrationer af dichlorprop både i kontrolpunkt og indvinding samt højere koncentrationer af nedbrydningsprodukterne. Nedbrydningsraten i model 2 har mindre betydning end i model 1, da vandets vertikale hastighed i sprækken i model 2 er langt hurtigere end den vertikale porevandshastighed benyttet i model 1.
Mindre sprækkeafstand Dichlorprop: 4-CPP:	1,7 µg/l 7,6 µg/l	0,15 µg/l 0,63 µg/l	Mindre sprækkeafstand → lavere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding. Des flere sprækker inden for kildeområdet des mindre vand løber der igennem hver sprække, resulterende i en lavere vertikale vandhastighed → længere tid med nedbrydning.
Længere afstand fra kilden til grundvandet Dichlorprop: 4-CPP:	1,8 µg/l 7,8 µg/l	0,15 µg/l 0,65 µg/l	Længere afstand fra kilden til grundvandet → mindre koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding, da nedbrydningen forløber over længere tid.



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

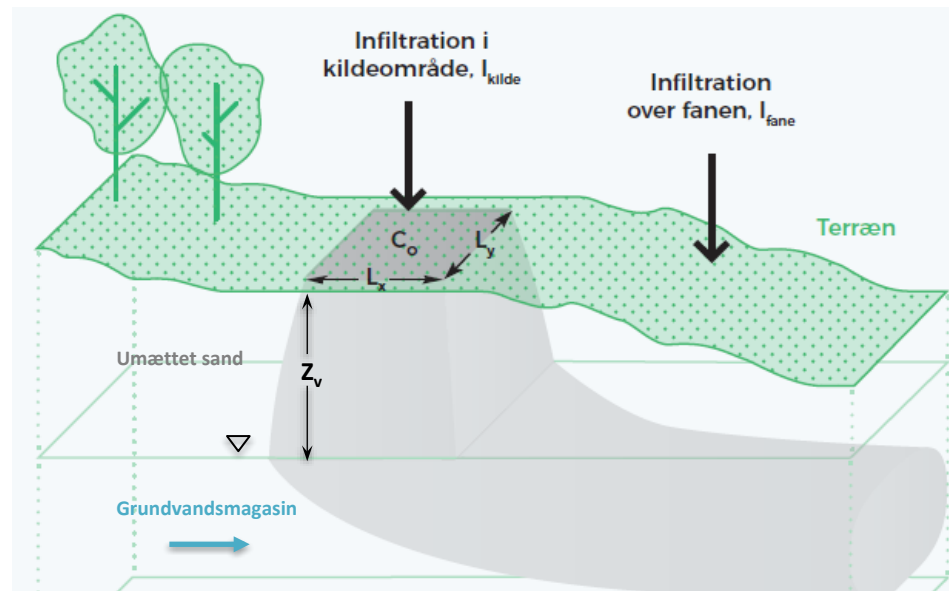
Model 3

Umættet sand

KAPITEL 6

Model 3: Umættet sand

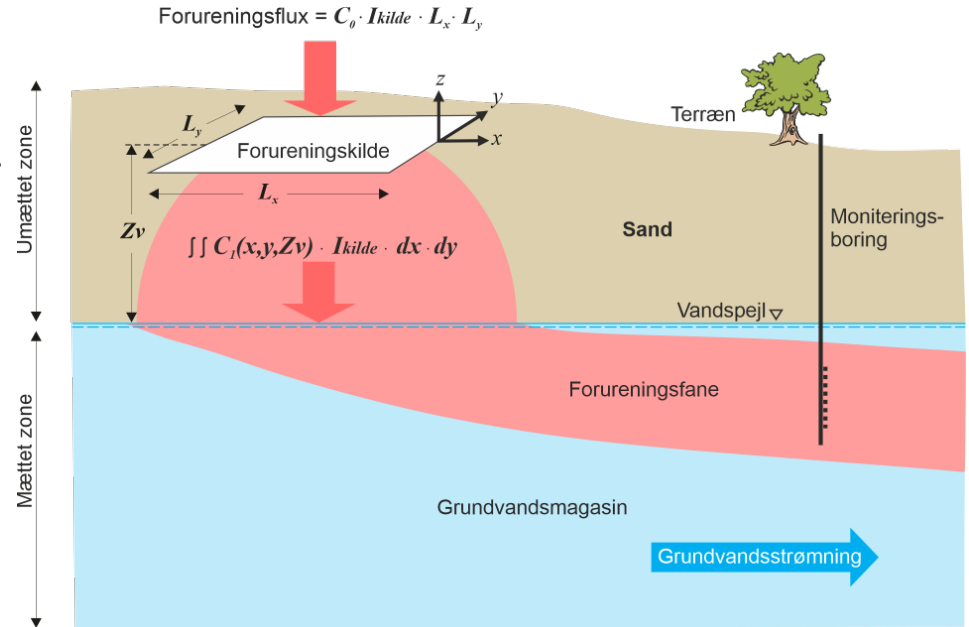
- Modellen beskriver en forureningskilde beliggende i umættet sand og inddrager diffusion i luftfasen som en væsentlig spredningsmekanisme for flygtige stoffer
- Forureningskilden er rektangulær med kildekonzentration C_o , længde L_x og bredde L_y
- Forureningen transporteres både ved diffusion i luftfasen og via advektion-dispersion i vandfasen.
- Spredningen sker både horisontalt og vertikalt



Model 3. Umættet sand. Z_v angiver afstanden fra bunden af kildeområdet til toppen af grundvandsmagasinet. Kildeområdet behøver ikke at være i niveau med terræn.

Model 3: Umættet sand

- Kildekoncentrationen C_0 reduceres under transporten til grundvandet som følge af nedbrydning og som følge af udspredning
- Omfanget af nedbrydning afhænger især af infiltrationen I_{kilde} , nedbrydningsraten k_v , afstanden til grundvandet Z_v , porøsiteten ε og vandindhold V_v .
- Nedbrydning sker som i de øvrige modeller kun i vandfasen
- Forureningens areal ved toppen af grundvandet er større end kildearealet.



Model 3. Umættet sand

Figur baseret på Miljøstyrelsen (2017).



Model 3: Stoftransportligning

- Den vertikale transport i model 3 bygger på følgende stoftransportligning, der summerer transportligninger for vand- og luftfase idet koncentrationen i luftfasen C_a er udtrykt ved $C_a = K_H C_w$, hvor K_H er den dimensionsløse Henry's lov konstant og C_w er koncentrationen i vandfasen
- Modellen tager højde for lineær sorption, advektion, dispersion og 1. ordens nedbrydning i vandfasen samt diffusion i gasfasen

$$\frac{\partial(R\theta_w + K_H\theta_a)C_w}{\partial t} = \nabla(\theta_w D_w + \theta_a K_H D_a)\nabla C_w - q_w \frac{\partial C_w}{\partial z} - \theta_w \lambda C_w$$

Retardationsfaktor

Dispersion i vandfasen og diffusion i luftfasen

Vertikal darcy hastighed

1 ordens nedbrydning i vandfasen

- Modellen inkl. den anvendte steady state løsning i GrundRisk er yderligere beskrevet i Miljøstyrelsen (2016a) og Miljøstyrelsen (2017)



Model 3: Tips og tricks

- Modellen er især beregnet til flygtige stoffer som vil kunne spredes i gasfasen i den umættede zone
- Modellen kan også benyttes for ikke-flygtige stoffer som alternativ til model 1. Da nedbrydning alene sker i vandfasen vil betydningen af nedbrydning i model 3 være mindre end i model 1
- Modellen kan ikke tage højde for sekventiel nedbrydning i den umættede zone, men kun under grundvandstransporten
- Infiltrationen skal være ens for kildeområde og forureningsfane for at modellen kan køre



Model 3: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Længde af kilde, L_x	m	Længde af kildeområde i grundvandets strømningsretning
Bredde af kilde, L_y	m	Bredde af kilde på tværs af grundvandets strømningsretning
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	Infiltration til grundvandet i kildeområdet
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen
Vertikal transport		
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	Afstanden fra bunden af kildeområdet og ned til toppen af grundvandsmagasinet
Porøsitet, ε	-	Porøsitet af dæklaget
Vandindhold, V_v		Vandfyldt porøsitet. Bemærk V_v er altid mindre end porøsiteten, ε
Longitudinal dispersivitet, $\alpha_{L,v}$	m	En standardværdi på 0,1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet, $\alpha_{T,v}$	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Som udgangspunkt foreslås anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b). Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.

I model 3 skal de to infiltrationer være ens

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterværdier



Model 3: Parametre til den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Horisontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D
Grundvandshastighed, u	m/s	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet, n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d ⁻¹	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over. Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet, α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
Vertikal dispersivitet, α_V	m	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi

Ens for alle modeller

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterværdier



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Case 3: BTEX-forurening i umættet sand



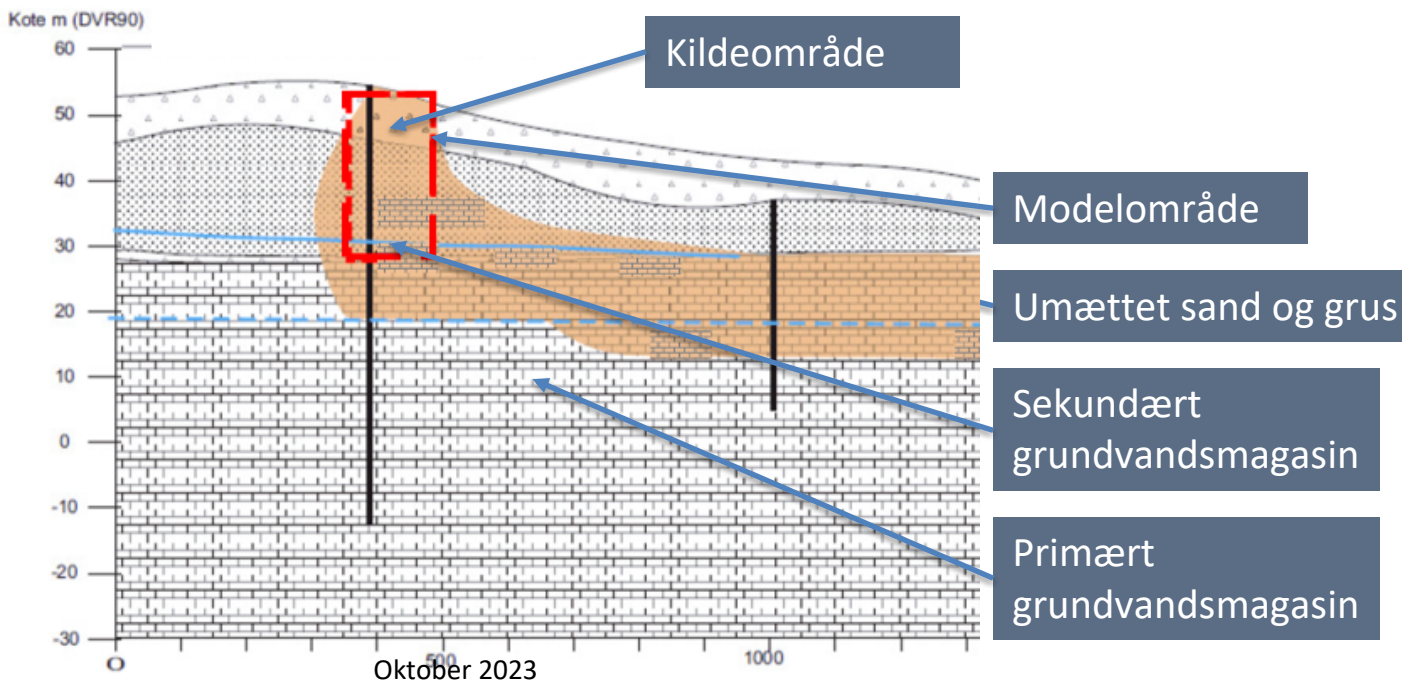
Case 3: BTEX-forurening i umættet sand

Geologi og grundvandsforhold

I caseområdet ses moræneler i de øverste ca. 7 m.u.t., hvorefter der træffes 20 m umættet smeltevandssand og –grus. Den nederste del af sand- og gruslaget er vandmættet og udgør et sekundært grundvandsmagasin. Under sand- og gruslaget er der ca. 1 m moræneler overlejrende det primære kalkmagasin.

Forurening

På lokaliteten forekommer BTEX-forurening, navnlig benzen og toluen, med kildekonzentrationer på 50 mg/l for begge stoffer. De højeste koncentrationer findes ca. 3-5 m.u.t.



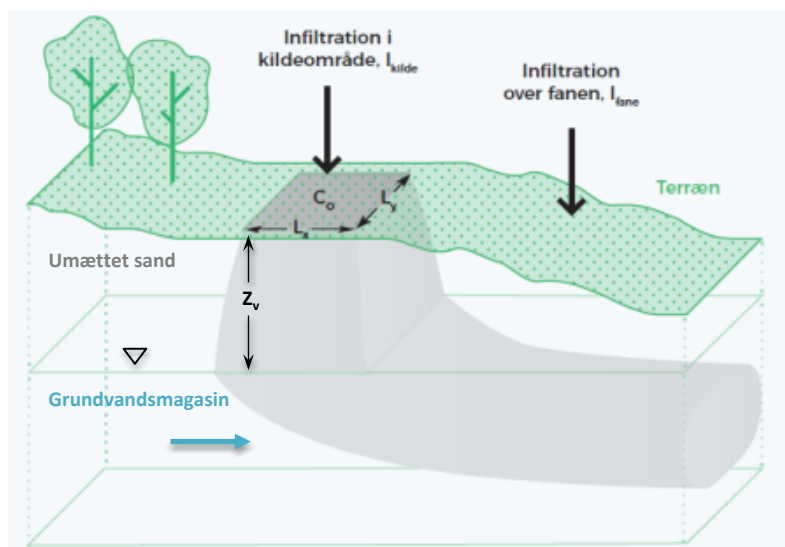
Der udføres en risikovurdering overfor det førstkommande magasin (sekundært magasin)



Case 3: BTEX-forurening i umættet sand - Modelkørsel

Opstil en model for scenariet præsenteret i case 3

1. Vælg Model 3 i GrundRisk
2. Brug parametrene præsenteret i parameteroversigten på de følgende slides.



Konceptuel model af Model 3



Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Parameteroversigt

Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Forureningskilde			
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Benzen: 50.000 Toluen: 50.000	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Længde af kilde, L_x	m	45	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Bredde af kilde, L_y	m	30	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	250	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	250	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Vertikal transport			
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v	m	18	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Porøsitet, ϵ	-	0,3 (Sand)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Vandindhold, V_v	-	0,15	Litteraturværdi baseret på jordtype
Longitudinal dispersivitet, $\alpha_{L,v}$	m	0,1	GrundRisk standardværdi er anvendt
Transversal dispersivitet, $\alpha_{T,v}$	m	0,01	GrundRisk standardværdi er anvendt
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Benzen: 0,004 Toluen: 0,004	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)



Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Parameteroversigt 2

Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Horisontal transport			
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	4	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grundvandshastighed, u	m/år		Beregnes i GrundRisk ud fra n , K og i
Porøsitet, n		0,25	Litteraturværdi for sand
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	$2 \cdot 10^{-4}$	K-værdi for groft sand (JAGG)
Hydraulisk gradient, i		0,0016	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Benzen: 0,004 Toluen: 0,004	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)
Longitudinal dispersivitet, α_l	m	1	Standardværdi i GrundRisk
Transversal dispersivitet, α_T	m	0,01	Standardværdi i GrundRisk
Vertikal dispersivitet, α_v	m	0,005	Standardværdi i GrundRisk

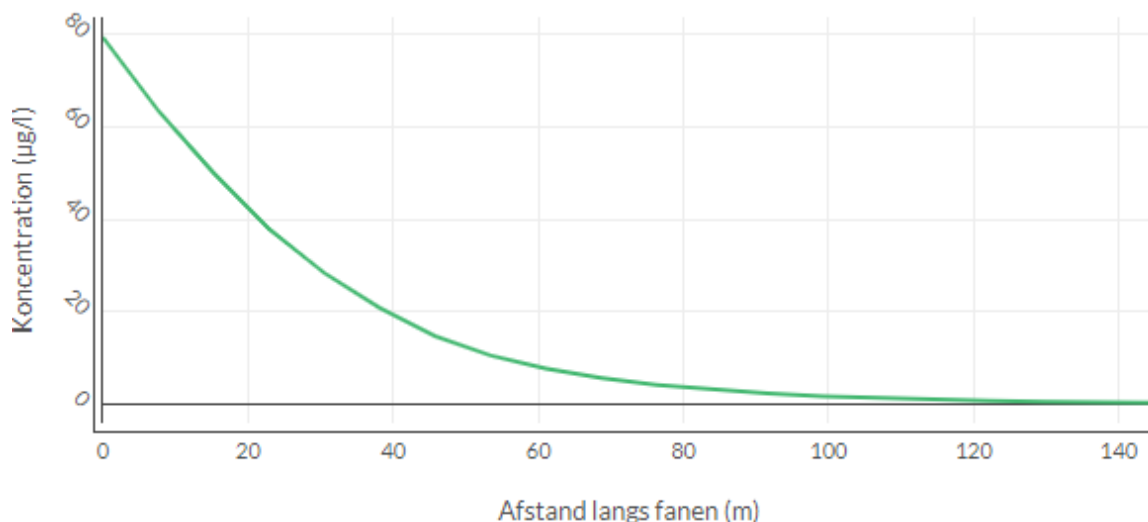
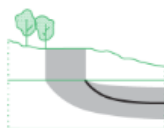


Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Modelresultater

Forureningsstof	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Risikovurdering	Kvalitetskriterie
Benzen:	1,7 µg/l	0,29 µg/l	Risiko	1 µg/l
Toluen:	2,0 µg/l	0,35 µg/l	Ingen risiko	5 µg/l

Koncentration langs fanen

Benzen



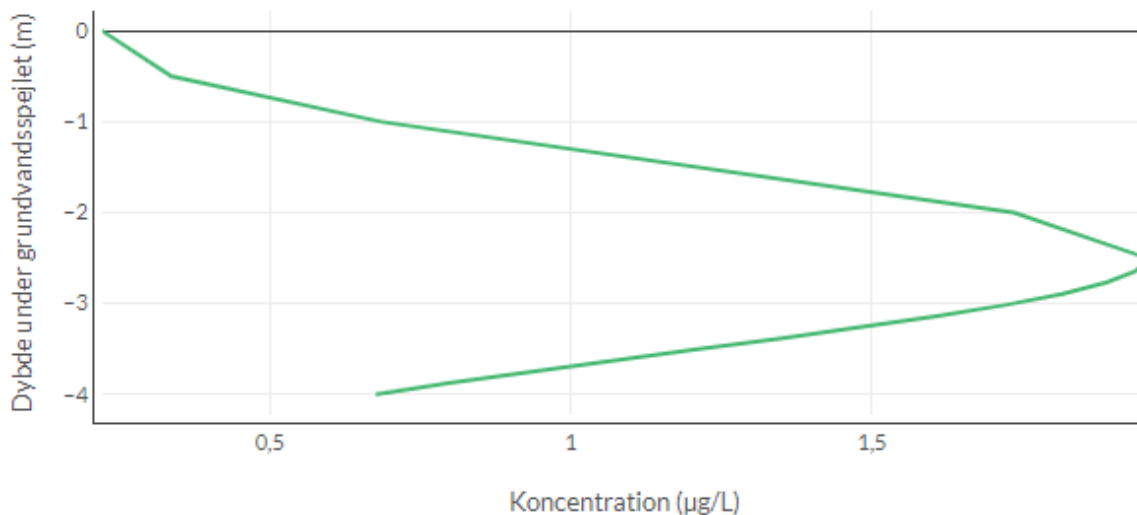
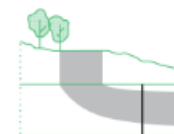
- De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over den valgte filterlængde.
- De er beregnet for dybderne med de højeste koncentrationer.
- Koncentration falder med afstanden grundet dispersion og nedbrydning under grundvandstransporten.



Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Modelresultater

Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms

Benzen



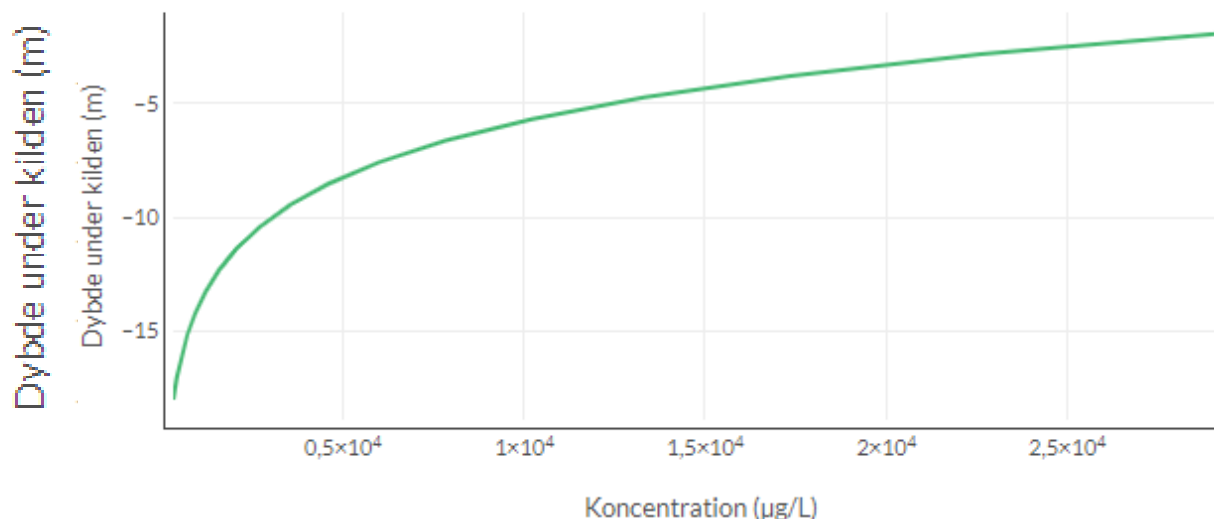
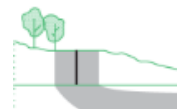
- Grafen viser koncentrationens variation over dybden i en nedstrøms afstand svarende til det valgte kontrolpunkt.
- Forureningsfanen bliver trykket nedad som følge af infiltration, og er derudover spredt ud som følge af dispersion



Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Modelresultater

Koncentration over grundvandsspejlet

☑ Benzen



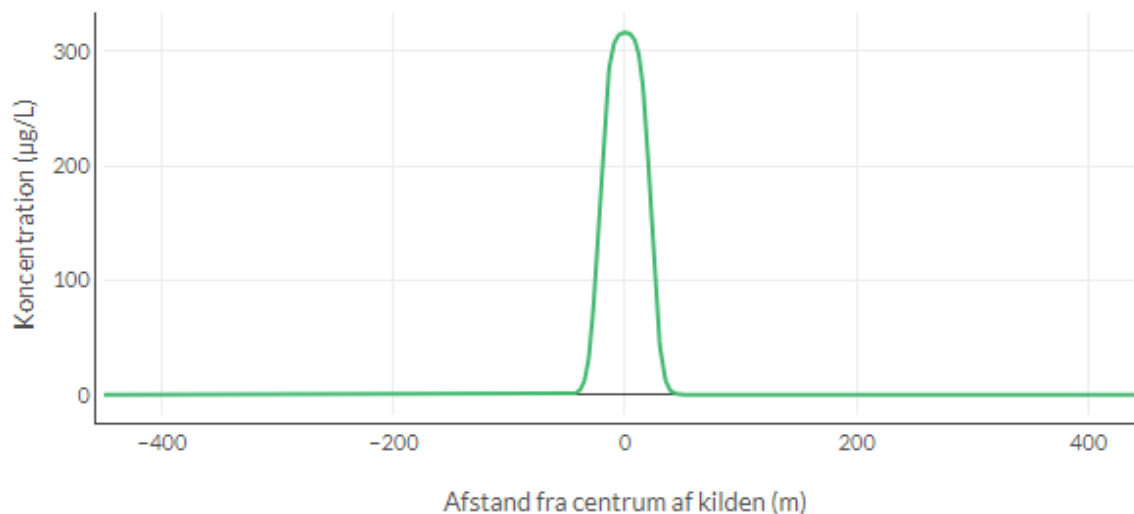
- Grafen viser koncentrationens variation over dybden fra forureningskilden og ned til grundvandsspejlet.
- Koncentration falder grundet 1. ordens nedbrydning under transporten i de 18 m umættet sand fra kildens bund og ned til grundvandsmagasinet samt som følge af diffusion i luftfasen og dispersion i vandfasen, der medfører en horisontal udspredding af forureningen



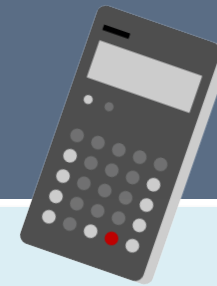
Case 3: BTEX-forurening i umættet sand – Modelresultater

Koncentrationen ved toppen af grundvandet

Benzen



- Grafen viser forureningskoncentrationens variation lige over grundvandsspejlet.
- Bredden på peaket afspejler bredden på forureningskilden når den rammer grundvandsspejlet.



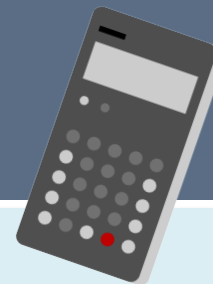
Case 3: Regneopgave med tilhørende løsninger

- Længden af kilden ved grundvandsspejlet

Arealet af forureningen øges med dybden ned gennem den vertikale transportzone. Den horisontale spredning sker på grund diffusion i luftfasen og dispersion i vandfasen.

1) Udregn længden af forureningskilden ved grundvandsspejlet

- i. Se på resultatgraferne i GrundRisk og aflæs ud fra disse længden af forureningskilden ved grundvandsspejlet.
- ii. Udregn hvor mange procent forureningskildens længde er vokset i forhold til den oprindelige forureningskilde

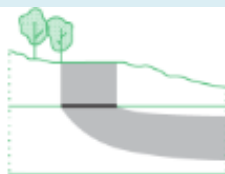


Case 3: Regneopgave løsninger

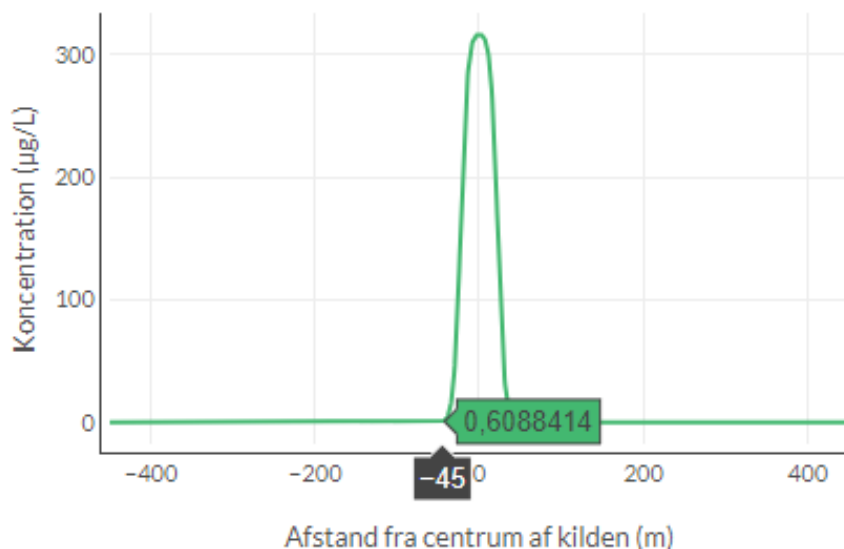
- Bredden af kilden ved grundvandsspejlet

Koncentrationen ved toppen af grundvandet

Figuren viser forureningskoncentrationens variation lige over grundvandsspejlet.



Benzen

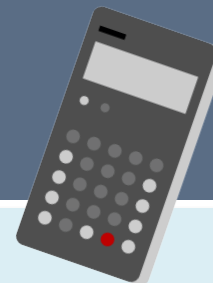


1 i) Længden af forureningskilden ved grundvandsspejlet

Ved at aflæse på grafen ses det, at forureningen har en udstrækning på 45 m på hver sin side af centrum af kilden. Den totale længde af forureningen ved grundvandsspejlet må derfor være **90 m**

1 ii) Udvidelse af kildeområdet

Det angivne kildeområde har en længde på 45 m. Ved grundvandsspejlet er forureningens længde dermed **100 %** større end i kildeområdet.



Case 3: Parameterforståelse

Undersøg hvorledes ændringen af udvalgte parametre, præsenteret i de grå bokse, påvirker koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen.

Tag udgangspunkt i den model der blev opstillet for case 3 (Basisscenarium). Undersøg kun i forhold til benzenkoncentrationen.

Indtast modelresultaterne i det tilhørende skema på næste slide og reflekter over resultatet.

Nedbrydning

Undersøg påvirkningen af lavere nedbrydningsrate i den vertikale transport.

Vælg $0,0002 d^{-1}$ der er den laveste nedbrydningsrate for Benzen angivet i GrundRisk

Afstand til grundvandsmagasinet

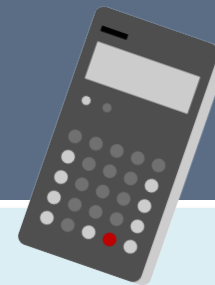
Undersøg betydningen af en mindre afstand fra kilden ned til grundvandsmagasinet

Vælg 9 m for at se hvad en halvering af afstanden har af betydning.

Vandindholdet

Undersøg betydningen af et lavere vandindhold i sandet.

Vælg et vandindhold på 0,1 der er den anbefalede værdi i GrundRisk for sandet jord

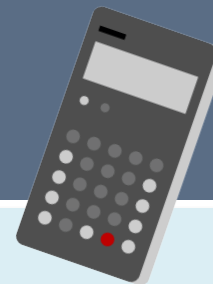


Case 3: Parameterforståelse - Resultatskema

Grundvandskvalitetskriterium (benzen): 1 µg/l

– Marker hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium	1,7 µg/l	0,29 µg/l	
Laveste nedbrydningsrate			
Halveret afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin			
Mindsket vandindhold			



Case 3: Parameterforståelse - Løsning

Grundvandskvalitetskriterium (benzen): 1 µg/l

– Hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium	1,7 µg/l	0,29 µg/l	
Laveste nedbrydningsrate	120 µg/l	24 µg/l	Lavere nedbrydning → højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding.
Halveret afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin	21 µg/l	3,6 µg/l	Mindre afstand → højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding. Dette skyldes at forureningen hurtigere når grundvandsmagasinet, hvilket mindsker tiden for nedbrydning i den umættede zone.
Mindsket vandindhold	13 µg/l	2,3 µg/l	Mindre vandindhold → højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding. Mindre vandindhold medfører mindre nedbrydning, da nedbrydningen foregår i vandfasen.



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

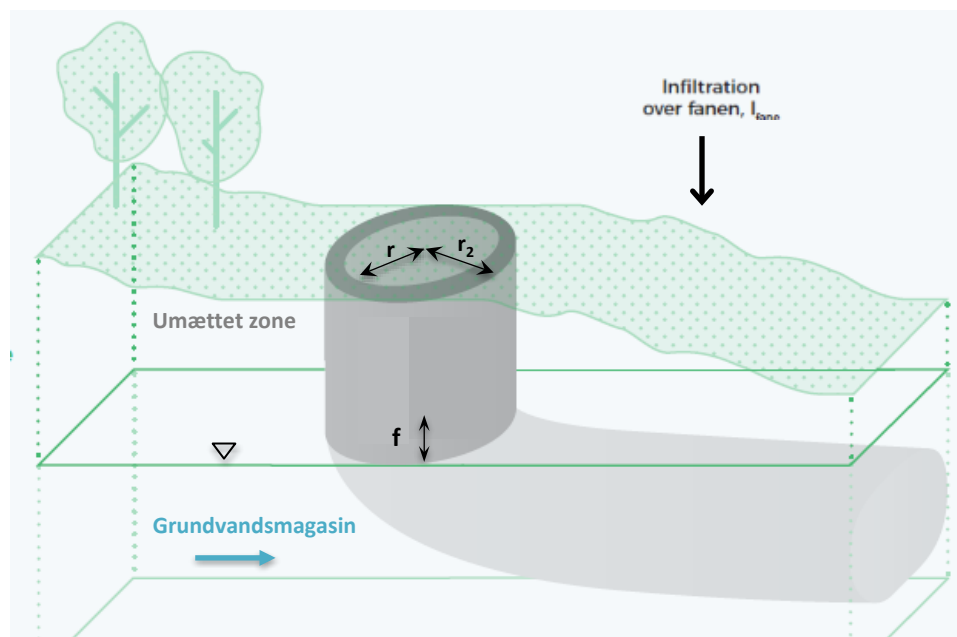
Model 4

Umættet sand med impermeabelt dæklag

KAPITEL 7

Model 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag

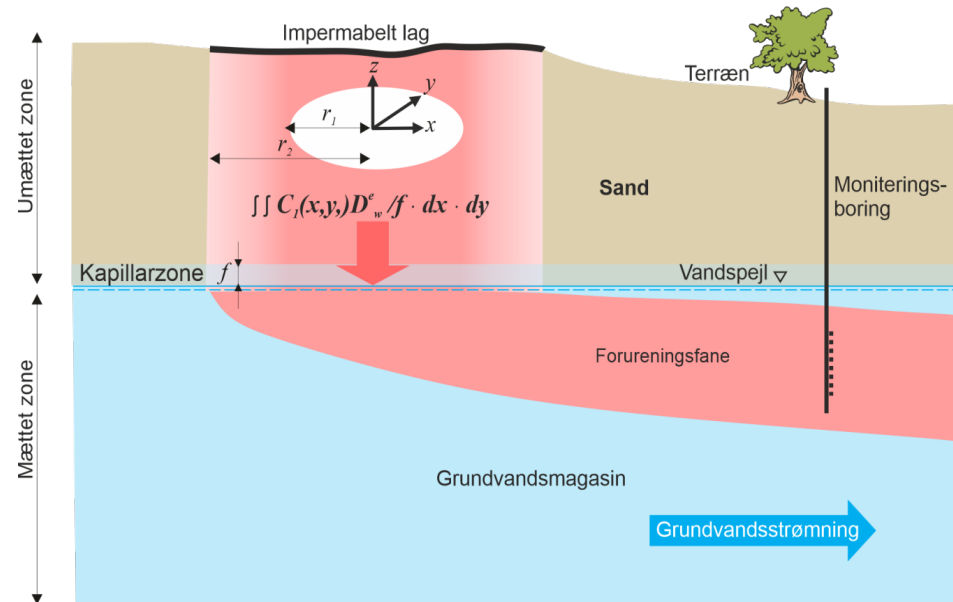
- Modellen beskriver en forureningskilde i umættet zone, i et tilfælde hvor der ikke sker infiltration til kildeområdet (f.eks. grundet bygninger eller tæt befæstelse) og spredningen derfor udelukkende er styret af diffusion
- Kildeområdet er cylinderformet med radius r og kildekonzentration C_0 og strækker sig fra start helt ned til grundvandet



Model 4. Umættet zone med impermeabelt dæklag.
Kildeområdet er cylinderformet med radius r . r_2 : grænseradius;
 f : højden af kapillarzonen

Model 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag

- Forureningen spredes horisontalt ud fra det cylinderformede kildeområde som følge af diffusion i luftfasen
- Forureningen transporteres til grundvandet via diffusion gennem kapillarzonen med højden f
- Der beregnes koncentrationer i toppen af grundvandsmagasinet under hensyntagen til 1. ordens nedbrydning med raten k_v
- Koncentrationen aftager med afstand til centrum af det cylindriske kildeområde



Model 4. Umættet zone med impermeabelt dæklag.
Kildeområdet er cylinderformet med radius r . r_2 : grænseradius; f : højden af kapillarzonen. Figuren er baseret på Miljøstyrelsen (2017)

Kapillarzonen er det område lige over grundvandet som er vandmættet pga. kapillærkræfterne, der får vandet til at stige op over grundvandszonen. Kapillærkræfter, er kræfter der skyldes et samspil mellem væskens overfladespænding og tiltrækning mellem væsken og væggen i røret eller porerne.



Model 4: Stoftransportligning

- Den vertikale transport i model 4 bygger på følgende stoftransportligning, der beskriver transporten i umættet zone når der ikke er nogen infiltration.
- Modellen tager højde for lineær sorption, diffusion i luft- og vandfase samt 1. ordens nedbrydning i vandfasen

$$\frac{\partial(R\theta_w + K_H\theta_a)C_w}{\partial t} = (\theta_a K_H D_a^e + \theta_w D_w^e) \left(\frac{\partial^2 C_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_w}{\partial r} \right) - \theta_w \lambda C_w$$

Retardationsfaktor

Diffusion i luft- og vandfase

1. ordens nedbrydning vandfasen

- Modellen inkl. den anvendte steady state løsning i GrundRisk er yderligere beskrevet i Miljøstyrelsen (2016a) og Miljøstyrelsen (2017)



Model 4: Tips og tricks

- Model 4 er især rettet mod flygtige stoffer som vil kunne spredes i gasfasen i den umættede zone for situationer, hvor der ikke er nogen væsentlig infiltration gennem kildeområdet, og hvor infiltrationen derfor ikke har betydning for spredningen af forureningen.
- Bemærk ved indtastning af parametre, at vandindholdet i den umættede zone skal være lavere end porøsiteten, da modellen ellers ikke kan køre.
- Modellen kan ikke tage højde for sekventiel nedbrydning i den umættede zone, men kun under grundvandstransporten.

Model 4: Parametre til forureningskilde og den vertikale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Radius af kildeområde, r	m	Kildeområde antages cylinderformet med radius r i Model 4
Grænseradius, r_2	m	Afstand fra center af kilden til der hvor koncentrationen antages lig nul. <i>Bemærk: Kun nødvendig, hvis nedbrydning ikke inkluderes.</i>
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen. <i>Bemærk: I denne model er der ikke infiltration over kilden pga. impermeabelt dæklag.</i>
Vertikal transport		
Kapillarzonens dybde, f	m	Den kapillære stighøjde over grundvandsspejlet
Porøsitet, ε		Porøsitet af dæklaget
Vandindhold, V_v		Vandfyldt porøsitet. Bemærk V_v er altid mindre end ε
1. ordens nedbrydningsrate, k_v	d^{-1}	Som udgangspunkt foreslås anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b). Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



Model 4: Parametre til den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Horisontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D
Grundvandshastighed, u	m/s	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet, n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d^{-1}	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over. Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet, α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi
Vertikal dispersivitet, α_V	m	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi

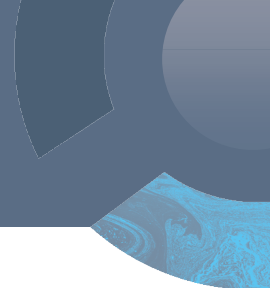
Ens for alle modeller

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag



Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag

Geologi og grundvandsforhold

OBS: Dette case-område genbruges fra case 3, her med antagelse om ingen infiltration over kilden og forurening med Tetraklorethylen (PCE).

I case-området ses moræneler i de øverste ca. 7 m.u.t., hvorefter der træffes 20 m umættet smeltevandssand og –grus. Den nederste del af sand- og gruslaget er vandmættet, og udgør et sekundært grundvandsmagasin. Under sand- og gruslaget er der ca. 1 m moræneler overlejrende det primære kalkmagasin.

Forurening

På lokaliteten forekommer forurening med PCE, med kildekonzentration på 97.000 µg/l umiddelbart under terræn.

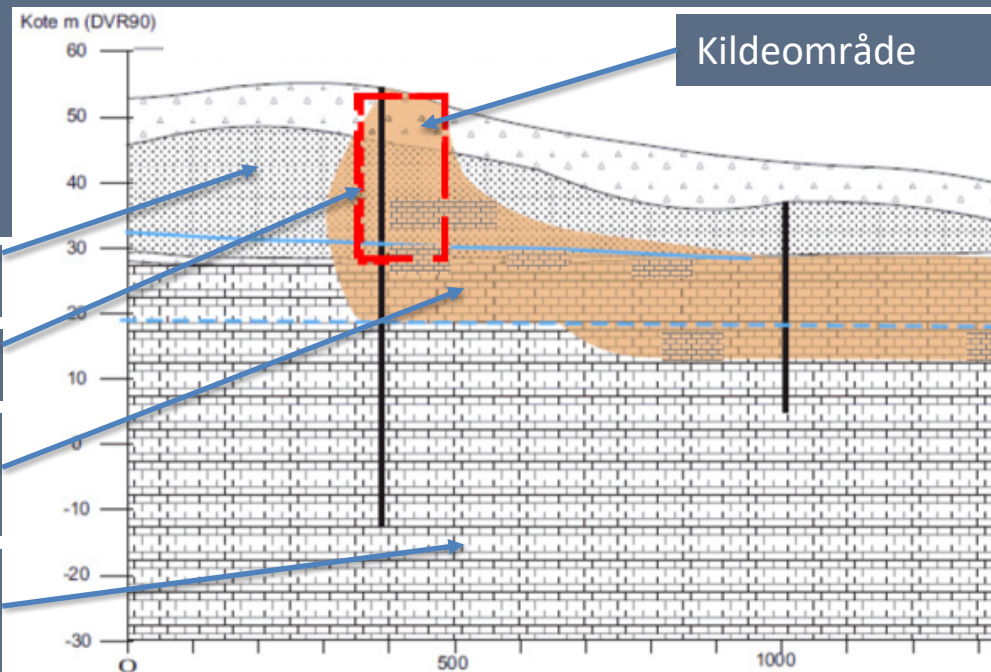
Der udføres en risikovurdering overfor det førstkommande magasin (sekundært magasin)

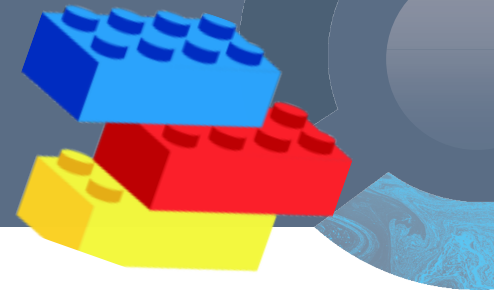
Umættet sand og grus

Modelområde

Sekundært grundvandsmagasin

Primært grundvandsmagasin

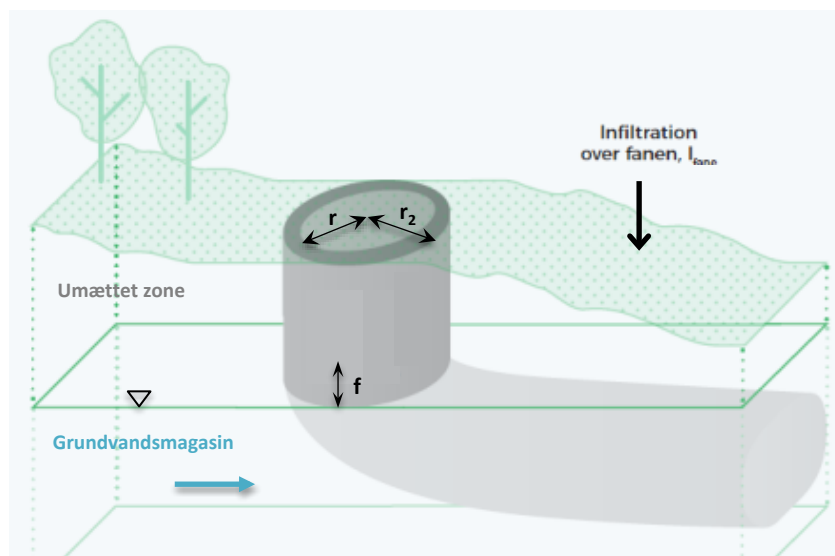




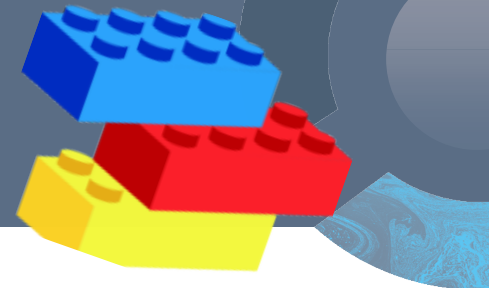
Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag - Modelkørsel

Opstil en model for scenariet præsenteret i case 4

1. Vælg Model 4 i GrundRisk
2. Brug parametrene præsenteret i parameteroversigten i de kommende slides.

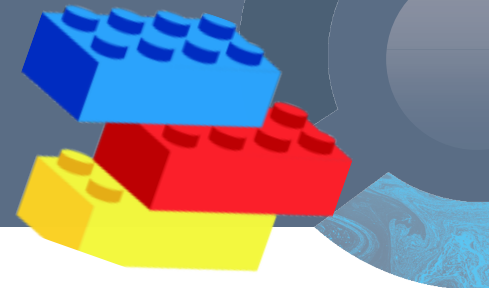


Konceptuel model af Model 4



Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag – Parameteroversigt

Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Forureningskilde			
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	PCE: 97.000	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen. Her kan man med fordel tage udgangspunkt i poreluftmålinger som omregnes til vandkoncentrationer (via fugacitet).
Radius af kildeområde, r	m	20	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grænseradius, r_2	m	200	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Infiltration over fanen, I_{fanen}	mm/år	250	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Vertikal transport			
Kapillarzonens dybde, f	m	0,28	Litteraturværdi baseret på jordtype
Porøsitet, ϵ		0,3 (sand)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Vandindhold, V_v		0,15	Litteraturværdi baseret på jordtype
1. ordens nedbrydningsrate, k_v PCE	d^{-1}	0,0007	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)



Case 4: Umættet sand med impermeabelt dæklag – Parameteroversigt 2

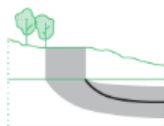
Parameter	Enhed	Værdi	Bestemmelse af parameter
Horisontal transport			
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	4	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grundvandshastighed, u	m/år	40	Udregnet på baggrund af K , i og n
Porøsitet, n		0,25	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	$2 \cdot 10^{-4}$	K - værdi for groft sand i JAGG
Hydraulisk gradient, i		0,0016	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
1. ordens nedbrydningsrate, k PCE	d^{-1}	0,0007	Anbefalet anaerobe nedbrydningsrate fra Miljøstyrelsen (2018b)
Longitudinal dispersivitet, α_L	m	1	Standardværdi i GrundRisk
Transversal dispersivitet, α_T	m	0,01	Standardværdi i GrundRisk
Vertikal dispersivitet, α_V	m	0,005	Standardværdi i GrundRisk



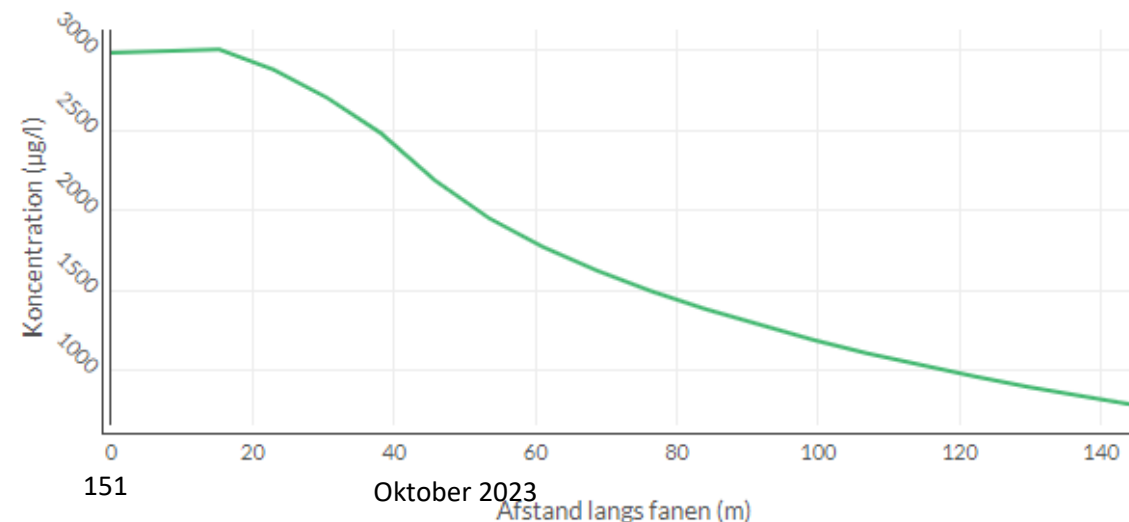
Case 4: BTEX-forurening i umættet sand med impermeabelt dæklag – Modelresultater

Forureningsstof	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Risikovurdering	Kvalitetskriterie
PCE	1.185 µg/l	214 µg/l	Risiko	1 µg/l

Koncentration langs fanen



Tetrachl...

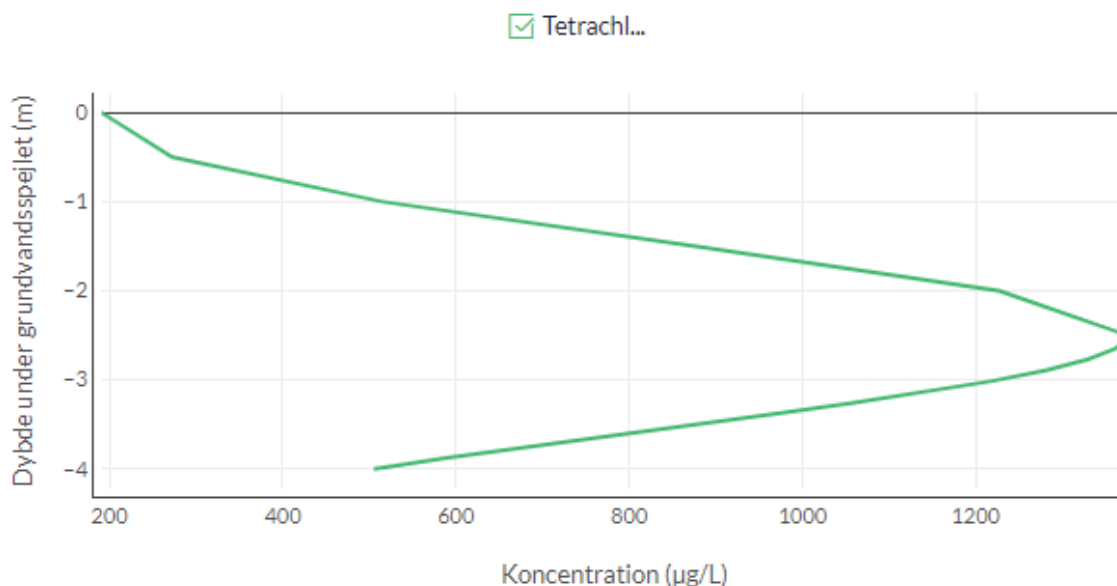
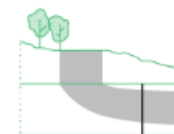


- De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over en filterlængde på 2 meter.
- De er beregnet for 2m filter som er lagt gennem tyngdepunktet af fanen, dvs. for dybden med den højeste koncentration.
- Koncentration falder med afstanden grundet dispersion og nedbrydning under grundvandstransporten.



Case 4: BTEX-forurening i umættet sand med impermeabelt dæklag Modelresultater

Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms



- Grafen viser koncentrationens variation over dybden i en nedstrøms afstand svarende til det kontrolpunkt, der kigges på.
- Forureningsfanen er trykket ned som følge af infiltration og spredt ud som følge af dispersion

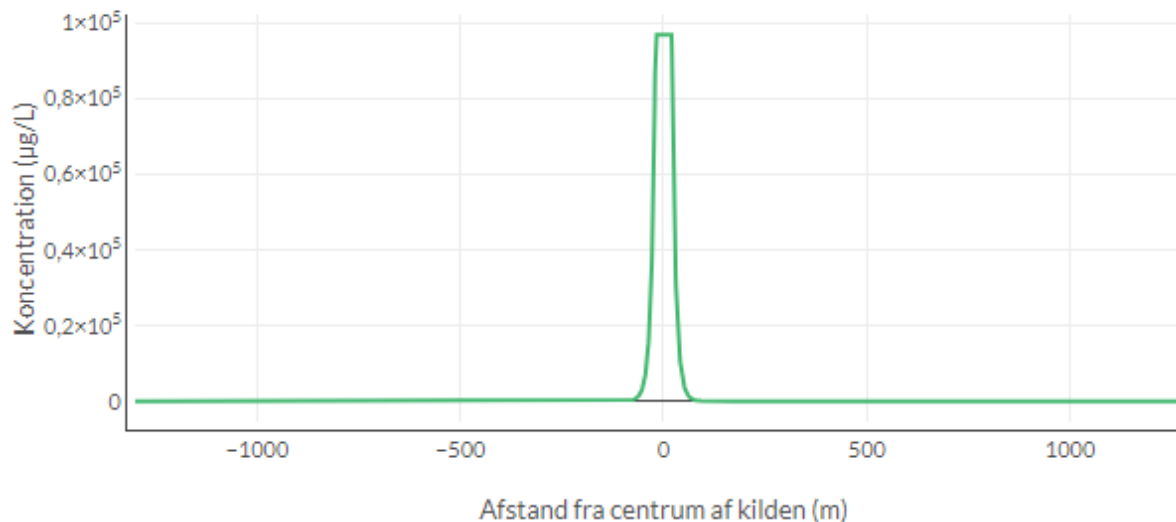


Case 4: BTEX-forurening i umættet sand med impermeabelt dæklag – Modelresultater

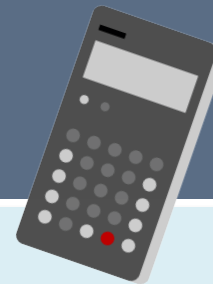
Koncentrationen ved toppen af grundvandet



Tetrachl...



- Grafen viser forureningskoncentrationens variation lige over grundvandsspejlet.
- Grafen er flad i toppen da koncentrationen er konstant indenfor det angivne kildeområde, som er cylinderformet og strækker sig ned til grundvandsspejlet.



Case 4: Parameterforståelse

Undersøg hvorledes ændringen af udvalgte parametre, præsenteret i de grå bokse, påvirker koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen.

Tag udgangspunkt i den model der blev opstillet for case 4 (Basisscenarium).

Indtast modelresultaterne i det tilhørende skema på næste slide og reflekter over resultatet.

Nedbrydning

Undersøg påvirkningen af højere nedbrydningsrate i den vertikale transport.

Vælg 0,017 der er den højeste anbefalede nedbrydningsrate for PCE i GrundRisk

Kapillarzonen

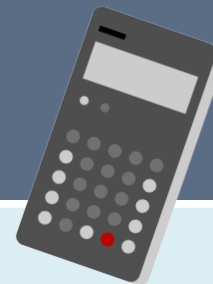
Undersøg betydningen af en mindre kapillarzone

Vælg 0,07 m der er den mindste anbefalede kapillarzonetykkelse i GrundRisk.

Vandindholdet

Undersøg betydningen af et lavere vandindhold i sandet.

Vælg et vandindhold på 0,1 der er den anbefalede værdi i GrundRisk for sandet jord

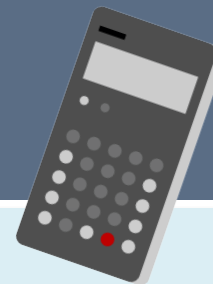


Case 4: Parameterforståelse - Resultatskema

PCE's kvalitetskriterie er $1 \mu\text{g/l}$

– Marker hvis koncentration overskrider kvalitetskriteriet

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium	1.185 $\mu\text{g/l}$	214 $\mu\text{g/l}$	
Højere nedbrydningsrate for PCE			
Mindre kapillarzone			
Mindsket vandindhold			



Case 4: Parameterforståelse - Løsning

PCE's kvalitetskriterie er $1 \mu\text{g/l}$

– Hvis koncentrationen overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium	1.185 $\mu\text{g/l}$	214 $\mu\text{g/l}$	
Højere nedbrydningsrate for PCE	882 $\mu\text{g/l}$	110 $\mu\text{g/l}$	Højere nedbrydning \rightarrow lavere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding.
Mindre kapillarzone	4.742 $\mu\text{g/l}$	854 $\mu\text{g/l}$	Mindre kapillarzone \rightarrow højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding. Dette skyldes, at jo større kapillarzonen er, jo lavere er koncentrationsgradienten mellem toppen og bunden af kapillarzonen, hvilket resulterer i en lavere diffusiv forureningsflux fra den umættede zone til grundvandsmagasinet
Mindsket vandindhold	2.235 $\mu\text{g/l}$	520 $\mu\text{g/l}$	Mindre vandindhold \rightarrow højere koncentrationer både i kontrolpunkt og indvinding. Lavere vandindhold medfører mindre nedbrydning da dette foregår i vandfasen.



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Model 5

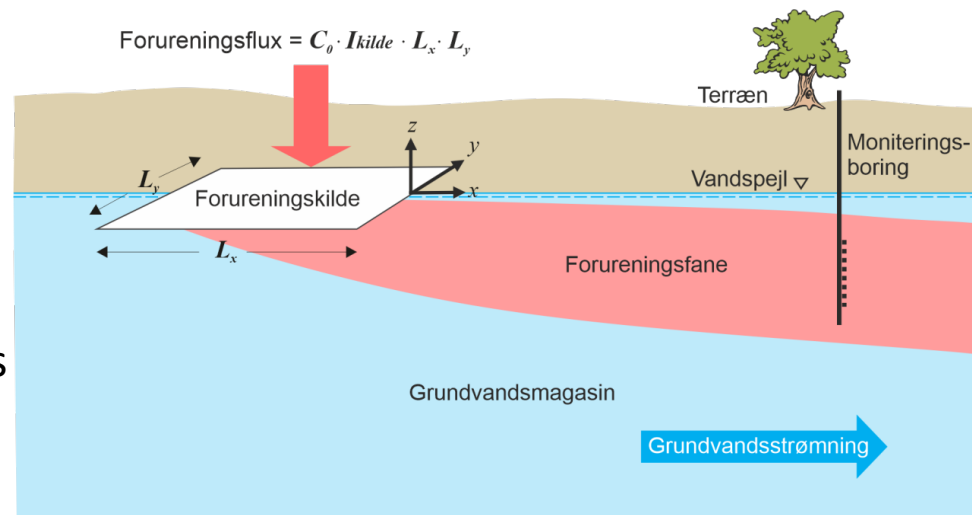
Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet

KAPITEL 8

Model 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandet

- Forureningskilde beliggende over et grundvandsmagasin
- Forureningskilden er rektangulær med kildekonzentration C_0 , længde L_x og bredde L_y
- Fluxinputtet J til grundvandet beregnes ud fra infiltrationen I_{kilde} , kildearealet ($L_x L_y$) og kildekonzentrationen C_0

$$J = C_0 I_{kilde} L_x L_y$$



Model 5. Forureningskilde beliggende lige over grundvandet

Figuren er baseret på Miljøstyrelsen (2017).



Model 5: Tips og tricks

- Model 5 er den mest konservative model. Hvis forureningskilden ikke udgør en risiko i kontrolpunktet 100 m nedstrøms ved brug af model 5, er der ikke nogen grund til at anvende de øvrige vertikale modeller.



Model 5: Parametre til forureningskilde og den horisontale transport

Parameter	Enhed	Bemærkning
Forureningskilde		
Kildekoncentration, C_0	$\mu\text{g/L}$	Koncentrationen i kildeområdet
Længde af kilde, L_x	m	Længde af kildeområde i grundvandets strømningsretning
Bredde af kilde, L_y	m	Bredde af kilde på tværs af grundvandets strømningsretning
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	Infiltration til grundvandet i kildeområdet
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	Infiltration til grundvandet over fanen
Horisontal transport		
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	Mægtigheden af magasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D
Grundvandshastighed, u	m/s	Porevandshastigheden. Denne kan enten indtastes eller beregnes ud fra hydraulisk gradient, hydraulisk konduktivitet og porøsitet
Porøsitet, n		Porøsitet for grundvandsmagasinet
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	Den hydrauliske ledningsevne i magasinet
Hydraulisk gradient, i		Trykgradienten i grundvandsmagasinet
1. ordens nedbrydningsrate, k	d^{-1}	Der foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere ove.r Der kan for udvalgte stoffer også vælges 1. ordens sekventiel nedbrydning.
Longitudinal dispersivitet, α_l	m	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi
Transversal dispersivitet, α_T	m	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi

Der henvises til [Kapitel 12](#) for uddybende forklaringer vedr. fastsættelse af parameterverdier



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet

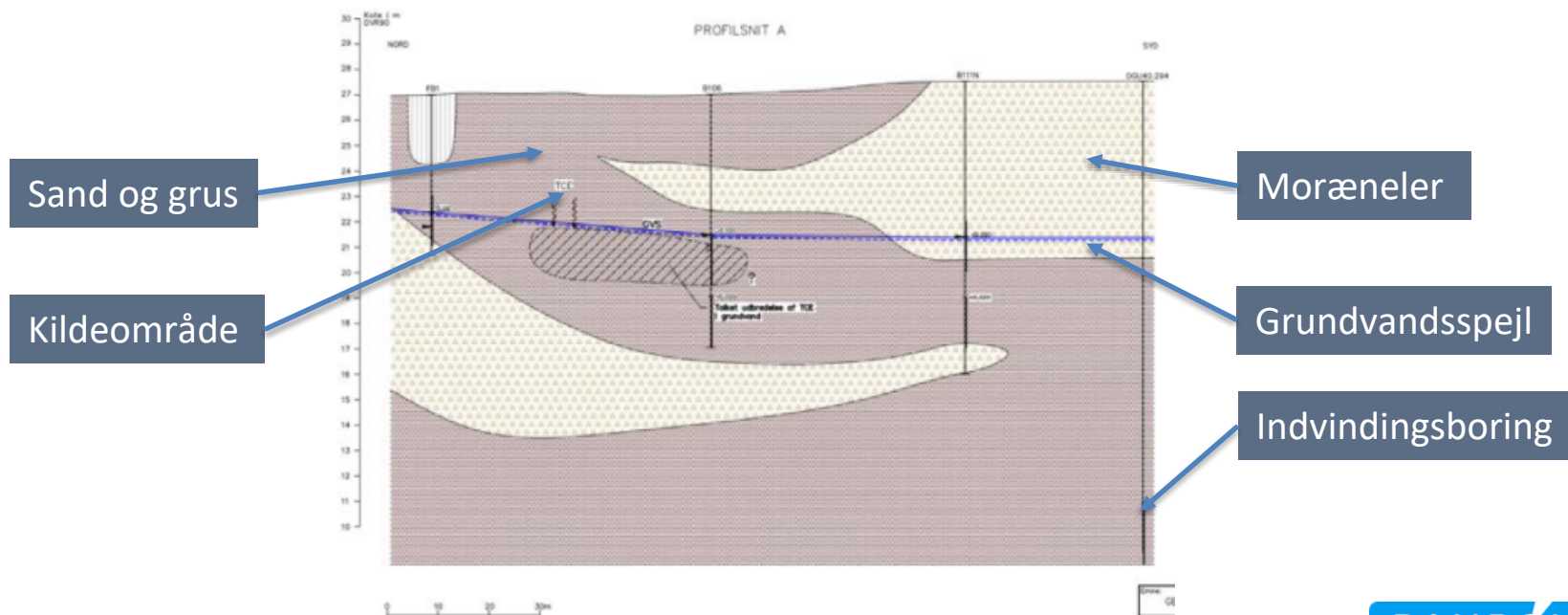
Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet

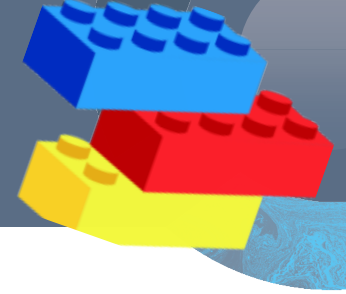
Geologi og grundvandsforhold

Geologien i case-området er domineret af smeltevandssand og -grus, med indslag af moræneler. Grundvandsspejlet er beliggende ca. 5 m.u.t. og grundvandet strømmer mod syd-sydøst, bl.a. grundet påvirkning fra en nærliggende indvindingsboring (yderst til højre i figuren).

Forurening

På lokaliteten forekommer forurening med Trichlorethylen (TCE) samt dets nedbrydningsprodukter cis-DCE og VC, med koncentrationer på hhv. 610, 22 og 0,27 µg/l.

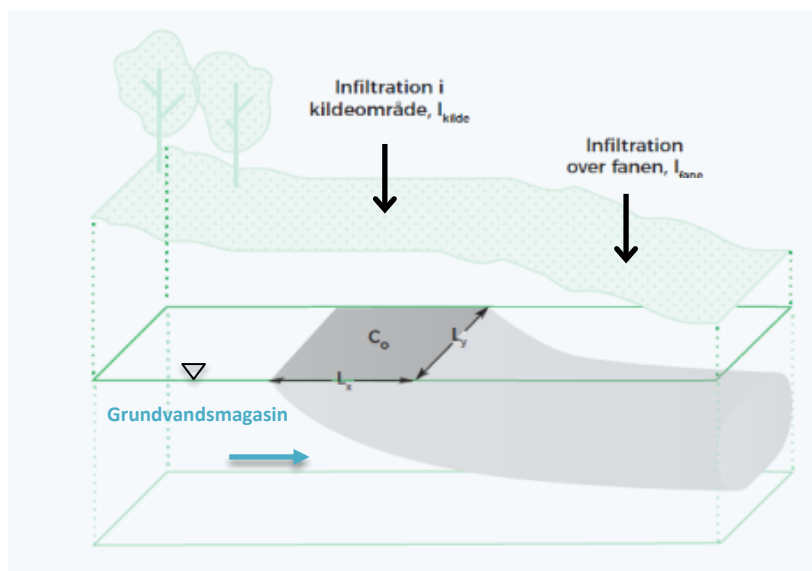




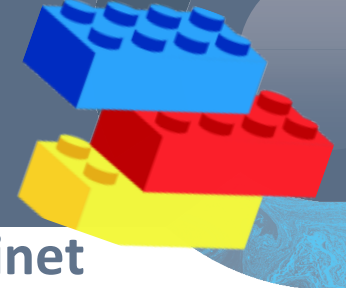
Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet - Modelkørsel

Opstil en model for scenariet præsenteret i case 5

1. Vælg Model 5 i GrundRisk
2. Brug parametrene præsenteret i parameteroversigten på næste slide.

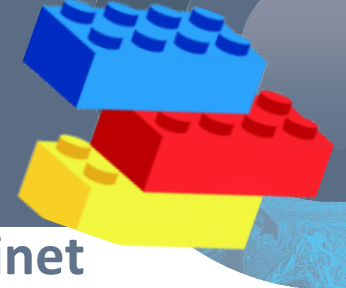


Konceptuel model af Model 5



Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet - Parameteroversigt

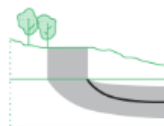
Parameter	Enhed	Værdi	Bemærkning
Forureningskilde			
Kildekoncentration, C_0	µg/L	Trichlorethylen (TCE): 610 cis-DCE: 22 VC: 0,27	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Længde af kilde, L_x	m	55	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Bredde af kilde, L_y	m	20	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Infiltration i kildeområde, I_{kilde}	mm/år	438	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Infiltration over fanen, I_{fane}	mm/år	438	Kommunebaseret værdi, JAGG 2.1
Horisontal transport			
Dybde af grundvandsmagasin, d	m	20	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
Grundvandshastighed, u	m/år	40	Udregnet på baggrund af Darcys lov, hvor parametrene er fundet ved feltundersøgelse
Porøsitet, n		0,25 (Kvartært sand)	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk konduktivitet, K	m/s	-	Litteraturværdi baseret på jordtype
Hydraulisk gradient, i		-	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen
1. Ordens sekventiel nedbrydningsrate, k	d ⁻¹	TCE: 0,0006 cis-DCE: 0,0007 VC: 0,0007	Anbefalede anaerobe nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b)
Longitudinal dispersivitet, α_l	m	1	Standardværdi i GrundRisk
Transversal dispersivitet, α_T	m	0,01	Standardværdi i GrundRisk
Vertikal dispersivitet, α_v	m	0,005	Standardværdi i GrundRisk



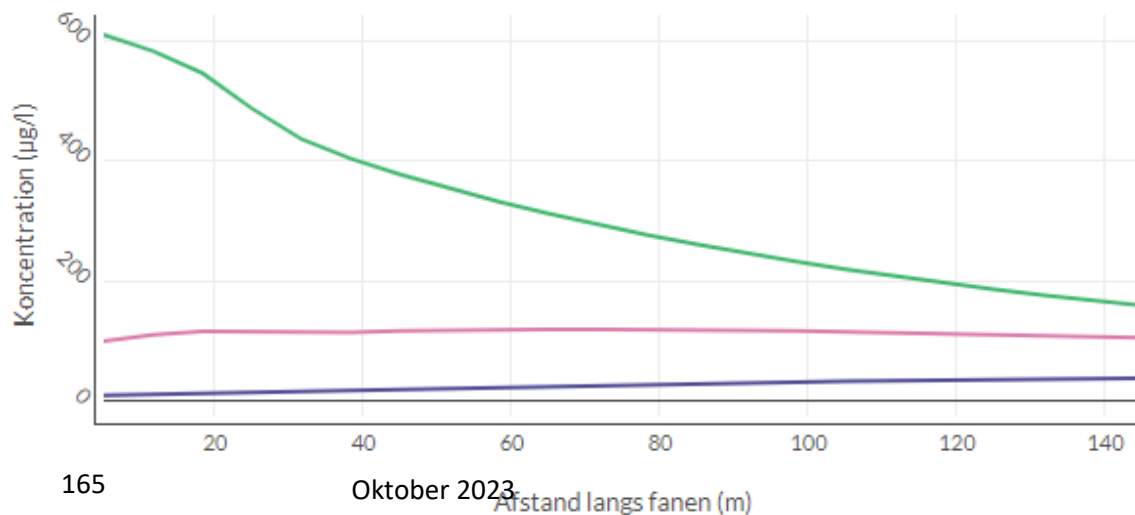
Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet - Modelresultater

Forureningsstof	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Risikovurdering	Kvalitetskriterie
Trichlorethylen: cis-1,2-	229 µg/L	17 µg/l	Risiko	1 µg/l
Dichlorethylen:	117 µg/l	7,1 µg/l	Risiko	1 µg/l
Vinylchlorid:	32 µg/l	1,6 µg/l	Risiko	0,2 µg/l

Koncentration langs fanen



Trichlor... cis-1,2-... Vinylchl...

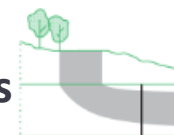
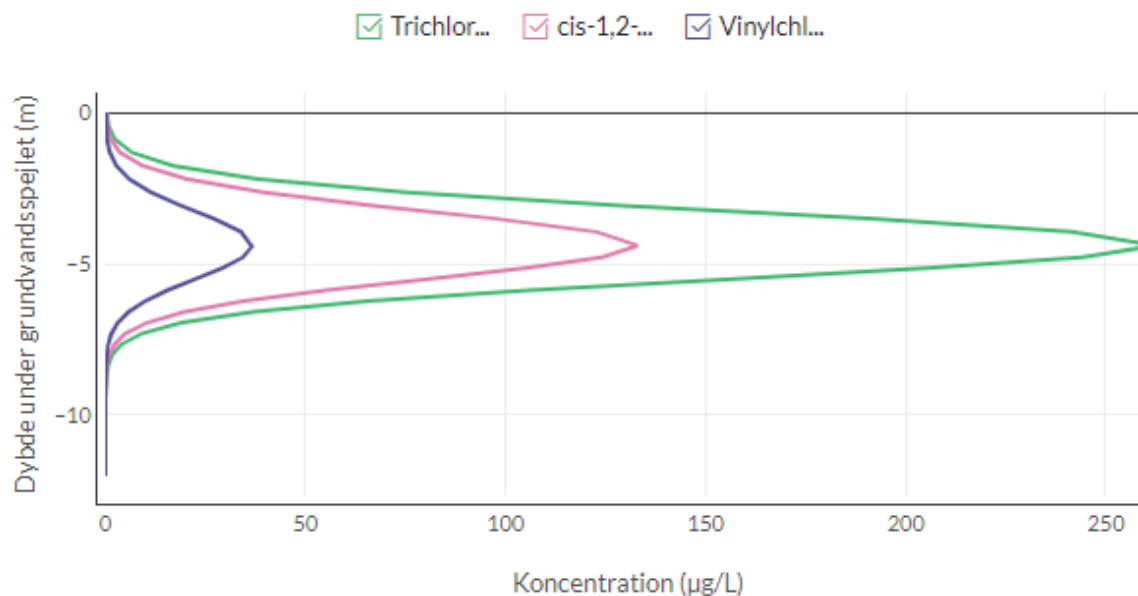


- De viste koncentrationer er midlede koncentrationer over den valgte filterlængde.
- De er beregnet for dybderne med de højeste koncentrationer.
- Koncentrationen af TCE falder med afstanden grundet dispersion og nedbrydning, hvorimod koncentrationen af nedbrydningsprodukter stiger fordi de produceres ved den reductive deklorering af TCE.



Case 5: Forureningskilde beliggende lige over grundvandsmagasinet - Modelresultater

Koncentrationen over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms



- Grafen viser variationen i koncentrationerne af TCE, cis-DCE og VC over dybden i kontrolpunktet 100 m nedstrøms
- Det ses at forureningsfanen er trykket ned som følge af infiltration til magasinet
- Fanen er derudover spredt ud som følge af dispersion



Case 5: Parameterforståelse

Undersøg hvorledes ændringen af udvalgte parametre, præsenteret i de grå bokse, påvirker koncentrationen i kontrolpunktet og indvindingsboringen.

Tag udgangspunkt i den model der blev opstillet for case 5 (Basisscenarium).

Indtast modelresultaterne i det tilhørende skema på næste slide og reflekter over resultatet.

Nedbrydning

Undersøg påvirkningen af højere nedbrydningsrate i den horisontale transport.

Vælg 0,007 der er den højeste anbefalede nedbrydningsrate for TCE i GrundRisk.

Grundvandshastighed

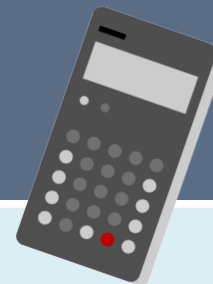
Undersøg betydningen af en hurtigere grundvandshastighed.

Vælg 80 m/år hvilket svarer til en dobbelt så stor hastighed som den benyttet i Basisscenariet.

Kontrolpunkt (afstand)

Undersøg betydningen af en øget afstand til kontrolpunktet.

Tilføj et nyt kontrolpunkt og vælg en afstand på 500 m, bevar et filter på 2 m.

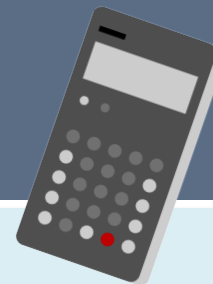


Case 5: Parameterforståelse - Løsning

TCE, cis-DCE og VC's kvalitetskriterier er hhv. 1 µg/l, 1 µg/l og 0,2 µg/l

– Hvis koncentrationen overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	229 µg/L 117 µg/l 32 µg/l	17 µg/l 7,1 µg/l 1,6 µg/l	
Højere Nedbrydningsrate for TCE Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:			
Hurtigere grundvandshastighed Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:			
Øget afstand til kontrolpunkt Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:			



Case 5: Parameterforståelse - Løsning

TCE, cis-DCE og VC's kvalitetskriterier er hhv. 1 µg/l, 1 µg/l og 0,2 µg/l

– Hvis koncentrationen overskrider kvalitetskriteriet er den markeret med rødt

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Koncentration i indvinding	Kommentar
Basisscenarium Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	229 µg/L 117 µg/l 32 µg/l	17 µg/l 7,1 µg/l 1,6 µg/l	
Højere Nedbrydningsrate for TCE Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	0,3 µg/L 176 µg/l 78 µg/l	0,05 µg/l 13 µg/l 4,6 µg/l	Øget nedbrydning → lavere koncentrationer for TCE både i kontrolpunkt og indvinding. Øget nedbrydning af TCE → højere koncentrationer af nedbrydningsprodukterne
Hurtigere grundvandshastighed Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	162 µg/L 46 µg/l 6,9 µg/l	22 µg/l 5,2 µg/l 0,6 µg/l	Hurtigere grundvandshastighed → lavere koncentrationer af TCE og nedbrydningsprodukter både i kontrolpunkt og indvinding. Den højere grundvandshastighed giver større fortynding i grundvandet, men samtidig fører den til mindre nedbrydning grundet lavere opholdstid i grundvandsmagasinet
Øget afstand til kontrolpunkt Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	14 µg/L 24 µg/l 24 µg/l	1,9 µg/l 3,1 µg/l 3,0 µg/l	Øge afstand → lavere koncentrationer af TCE og nedbrydningsprodukter både i kontrolpunkt og indvinding. Dette skyldes at nedbrydningen kan forløbe over en længere periode.



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Valg af model

KAPITEL 9



Valg af model

- ✓ **Model 5** er den mest konservative model. Der kan startes ud med denne. Udgør forureningen ikke en risiko ved brug af model 5, er der ikke nogen grund til at anvende de øvrige vertikale modeller.
- ✓ Vælg **model 5**, hvis der ikke regnes med nedbrydning i dæklaget
For meget flygtige stoffer i umættet zone kan **model 3** og **model 4** alternativt vælges for at tage højde for stofspredning i luftfasen.
- ✓ Brug tabellen på næste slide til at identificere relevante modeller baseret på forureningskildens beliggenhed, stoffets flygtighed og nedbrydning.



Identifikation af model ud fra følgende tre spørgsmål:

① Hvor er forureningskilden beliggende?



② Er forureningsstoffet flygtigt?



③ Sker der nedbrydning under den vertikale transport til grundvandet?



Forslag til model ses i tabel på næste slide



Identifikation af model ud fra beliggenhed af kilde, flygtighed og nedbrydning:

1) Hvor er forureningskilden beliggende?	2) Er forureningsstoffet flygtigt?	3) Skal nedbrydning inkluderes under vertikal transport?	Anbefalet model
I/over lerlag uden sprækker	Ja eller nej	Ja	Model 1
		Nej	Model 5
I/over moræneler med sprækker	Ja eller nej	Ja	Model 2
		Nej	Model 5
I umættet sand	Flygtigt	Ja eller nej	Model 3
			Model 4 (hvis kildeområdet er dækket af impermeabelt dæklag)
	Ikke flygtigt	Ja	Model 1 ^{a)}
		Nej	Model 3 ^{a)}
Lige over grundvandsmagasin	Ja eller nej	Ja	Model 4 (hvis kildeområdet er dækket af impermeabelt dæklag)
		Nej	Model 5
Usikkerhed på dæklaget mellem kilde og grundvandsmagasin	Ja eller nej	Nej	Model 5

^{a)} Bemærk: Da nedbrydningen kun sker i vandfasen og ikke i luftfasen vil nedbrydning med samme rate have større betydning i model 4 end i model 3



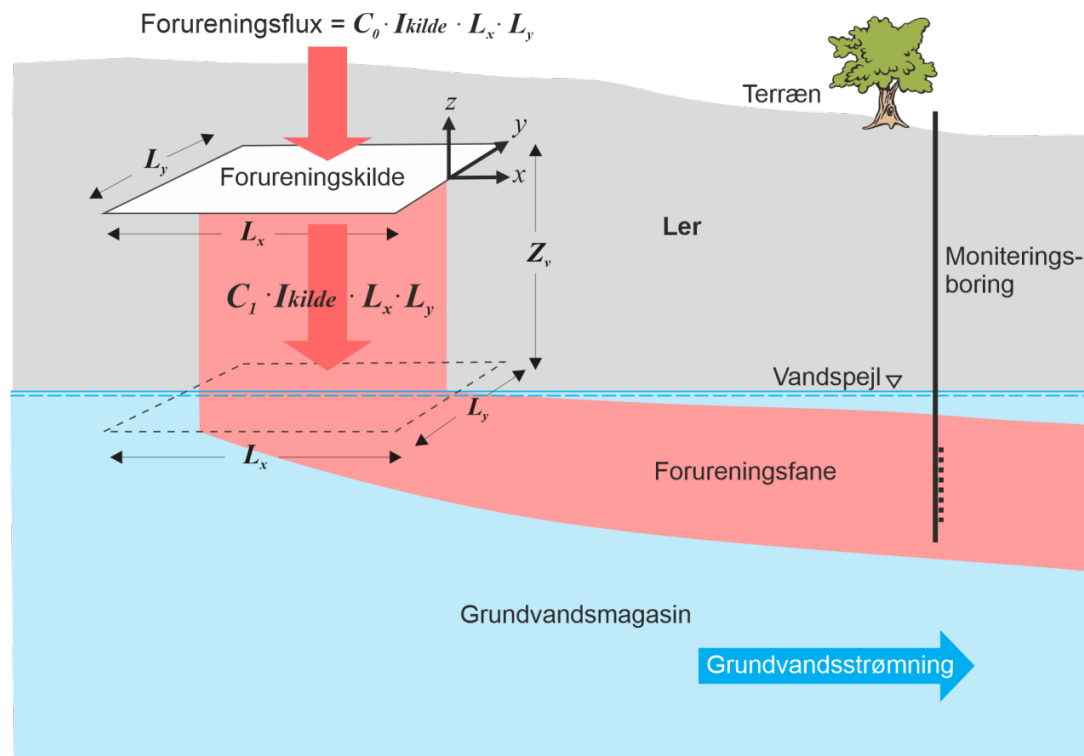
Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Kobling af de vertikale modeller med den horisontale model

Kapitel 10

Den horisontale stoftransportmodel og kobling til de vertikale modeller

- Den horisontale model tager udgangspunkt i en forureningsflux (masse/tid) som er outputtet fra den anvendte vertikale model



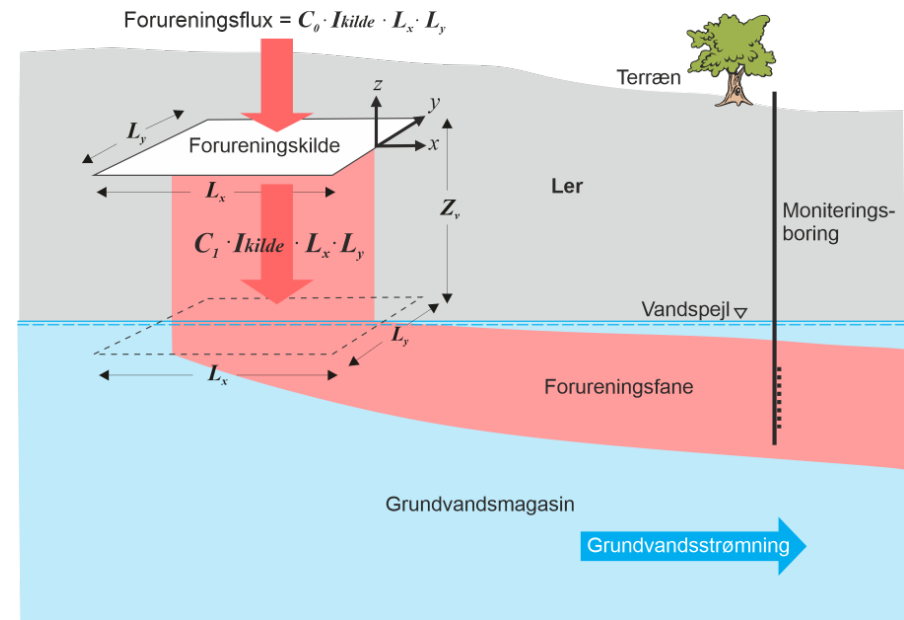
Model 1. Homogen vandmættet ler.

Figur baseret på Miljøstyrelsen (2017).

Den horisontale stoftransportmodel og kobling til de vertikale modeller (Model 1, 2 og 5)

- For Model 1, 2 og 5 er arealet ved toppen af grundvandsspejlet svarende til kildens areal ($L_x \cdot L_y$) og koncentrationen C_1 ved toppen af grundvandsmagasinet antages konstant over arealet A .
- Fluxinputtet (masse/tid) til grundvandet er dermed givet ved

$$J = C_1 I_{kilde} L_x L_y$$

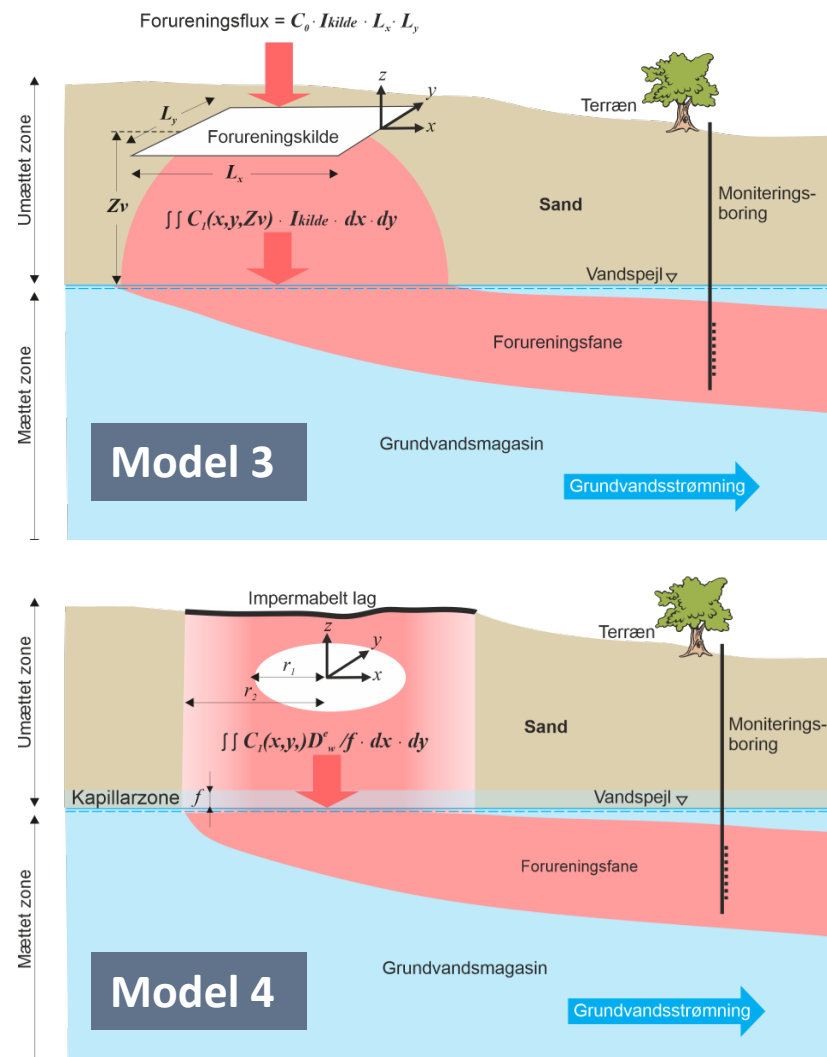


Model 1. Homogen vandmættet ler.

Figur baseret på Miljøstyrelsen (2017)

Den horisontale stoftransportmodel og kobling til de vertikale modeller (Model 3 og 4)

- Model 3 og 4 adskiller sig fra de øvrige modeller idet:
 - Det forurenede areal ved toppen af grundvandsspejlet er større end i kildeområdet
 - Koncentrationen ved toppen af grundvandsspejlet varierer over sted (se næste slide)
 - Fluxinputtet til grundvandet beregnes ved at integrere koncentrationen $C_1(x,y,z_v)$ over arealet og gange med infiltrationen (Model 3) eller gange med den effektive diffusionskoefficient divideret med højden af kapillarzonen (Model 4).

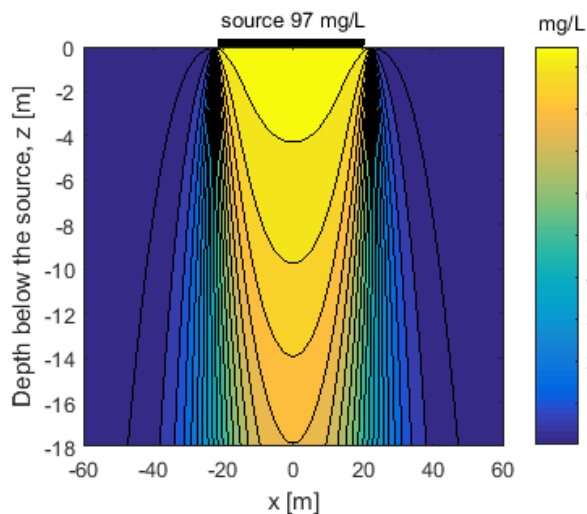


Figurer baseret på Miljøstyrelsen (2017).

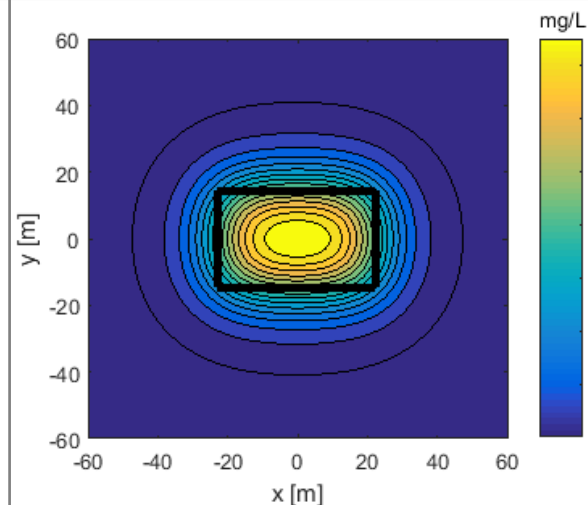
Horisontal spredning under den vertikale transport i model 3 og model 4

Model 3: Umættet sand

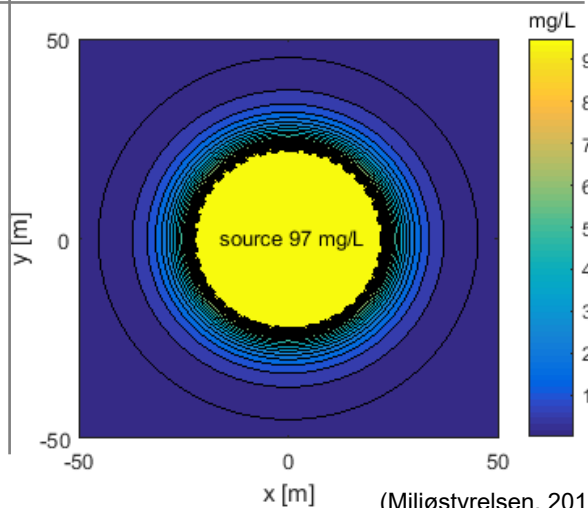
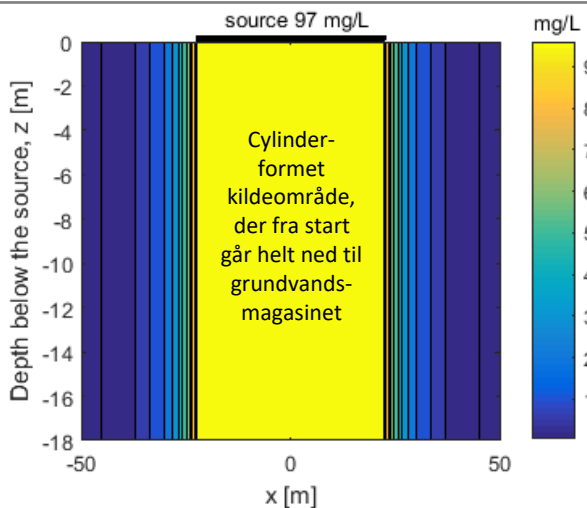
**PCE koncentration i et vertikalt
snit fra bunden af kildeområdet
til toppen af grundvandet**



**PCE koncentration i plant snit
ved toppen af
grundvandspejlet**



Model 4: Umættet sand
med impermeabelt dæklag



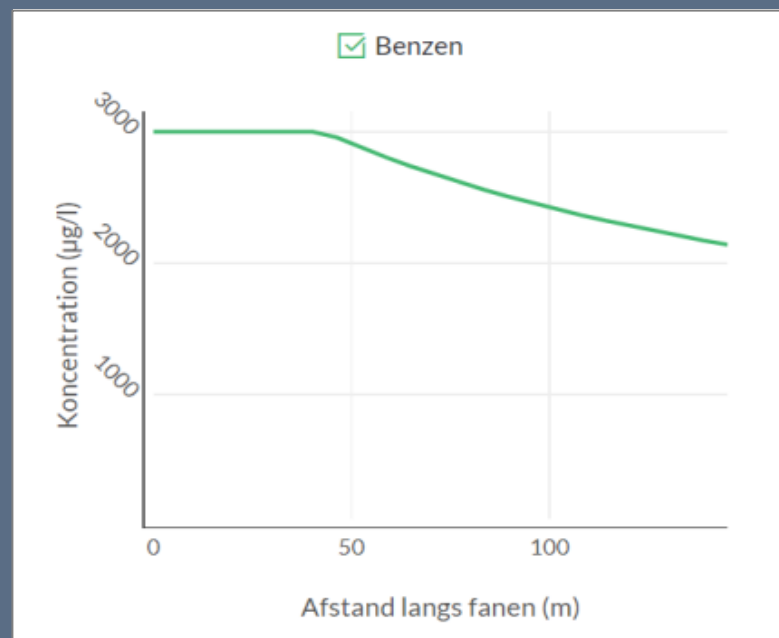


Opmærksomhedspunkt vedr. vandbalancen

Modellen antager at hastigheden i grundvandsmagasinet er konstant og at vandbalancen ikke påvirkes af det vand, der infiltrerer gennem kildeområdet.

Ved meget **store forureningskilder**, eller **meget høje infiltrationsrater**, kan den vertikale vandflux til magasinet overstige den horisontale vandflux i grundvandsmagasinet. For disse tilfælde vil der fejlagtigt beregnes højere koncentrationer i grundvandsmagasinet end i kildeområdet.

GrundRisk-koden reducerer koncentrationen i grundvandet lige nedstrøms kilden til at være lig med kildekonzentrationen, og grafen får et fladt forløb lige nedstrøms kildeområdet som vist på figuren. Der ændres ikke på fluxen dvs. massen i systemet er bevaret.





Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Usikkerhedsvurdering af resultater i GrundRisk Risikovurderingen

Kapitel 11



Usikkerhedsvurdering

Et resultat i GrundRisk er som andre resultater af modelberegninger behæftet med usikkerhed. Det er derfor vigtigt at gøre sig overvejelser om betydningen af usikkerheden for det resultat man får i GrundRisk.

Det anbefales derfor at,

- den **konceptuelle usikkerhed*** beskrives og belyses
- der udføres **en vurdering**** af usikkerheden på relevante **parametre og inputs**.

Den **konceptuelle usikkerhed er usikkerheden omkring valg af model og hvorvidt den valgte model er repræsentativ for forureningen*

***I en **parameter usikkerhedsanalyse** belyser man usikkerheden vedr. den konkrete værdi for en parameter (fx. Kildelængde eller infiltration) og den påvirkning denne har på resultatet af modelberegninger.*



Konceptuel usikkerhed i GrundRisk Risikovurdering

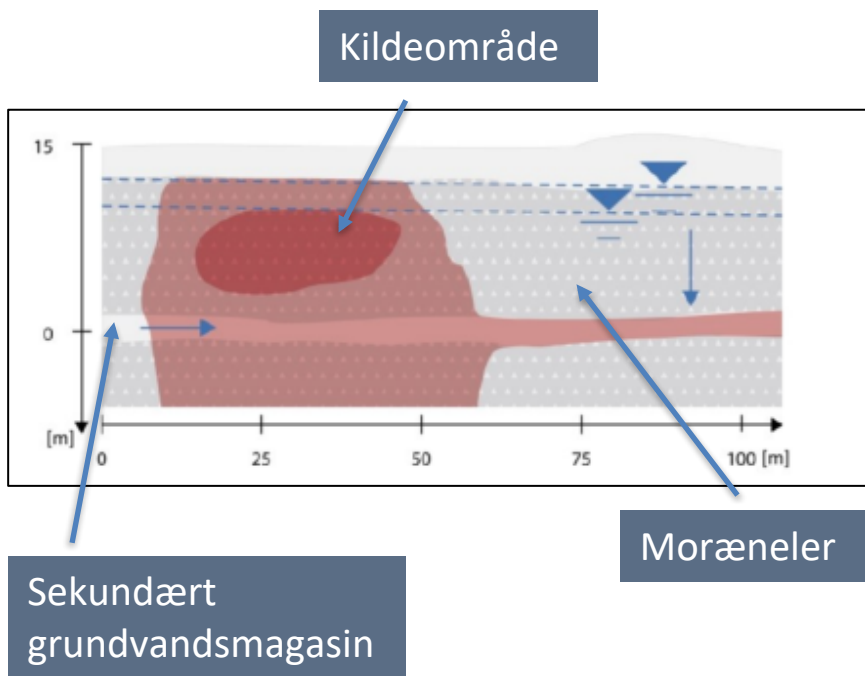
En fordel ved GrundRisk er de mange forskellige vertikale modeller man kan vælge i mellem. Det giver mulighed for at vurdere betydningen af forskellige elementer i den konceptuelle model, og på den måde lave en realistisk risikovurdering.

Udfordringen er at vælge den model som passer til lokaliteten. I [kapitel 9](#) er der lavet en vejledning til valg af model i GrundRisk Risikovurdering.

Generelt gælder det, at hvis man er i tvivl om hvilken model, man skal vælge, så kan man starte med model 5. Model 5 er den mest konservative model. Udgør forureningen ikke en risiko ved brug af model 5, er der ikke nogen grund til at anvende de øvrige vertikale modeller.

Eksempel 1: Konceptuel usikkerhed i GrundRisk Risikovurdering

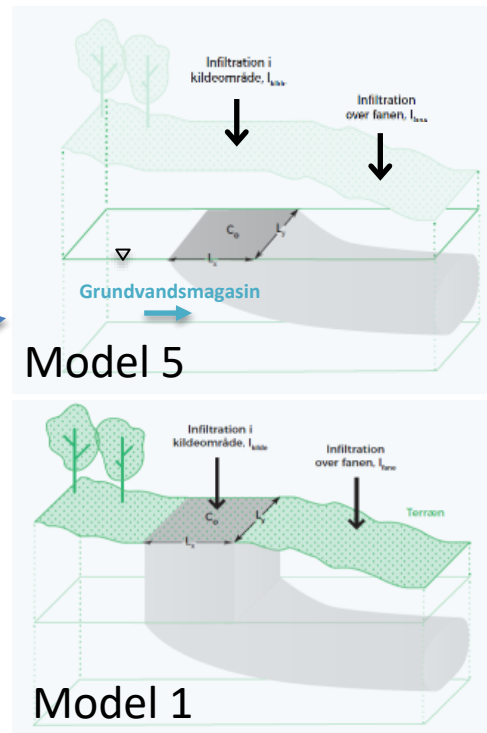
Hvilken model ville du vælge, hvis din konceptuelle model for kilden så sådan ud?



?

?

?



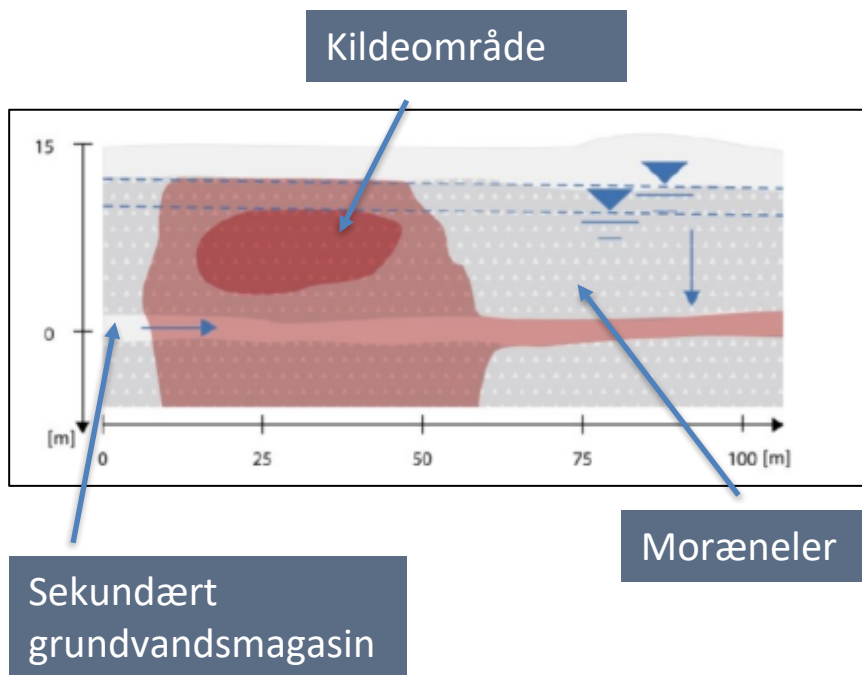
Model 5

Model 1

Andre modeller?
F.eks. model 2

Eksempel 1: Konceptuel usikkerhed i GrundRisk Risikovurdering

Hvilken model ville du vælge, hvis din konceptuelle model for kilden så sådan ud?



Model 5 er den mest konservative model. Udgør forureningen ikke en risiko ved brug af model 5, er der ikke nogen grund til at anvende de øvrige vertikale modeller.

Det er relevant at vælge en anden model end model 5 hvis der skal tages højde for nedbrydning i dæklaget.

Model 1 og 2 Hvis der er viden om et dæklag af en vis betydning på lokaliteten og man ønsker at inkludere nedbrydning i beregningen kan model 1 eller 2 anvendes som et alternativ til model 5. Estimatet vil blive mindre konservativt, men det vil for mange lokaliteter være mere realistisk.



Parameterusikkerhed i GrundRisk Risikovurdering

Parameter usikkerhed i GrundRisk Risikovurdering skal målrettes de parametre man på baggrund af undersøgelsesresultater er mest usikker på. Det kan f.eks. være parametre som nedbrydningsrater eller den hydrauliske konduktivitet. Det vil sjældent være relevant at udføre en usikkerhedsvurdering for alle parametre.

Formålet med at udføre en usikkerhedsvurdering af parametrene kan variere, f.eks.:

1. Vurdering af usikkerheden på resultatet, i forhold til om der er risiko på lokaliteten
2. Vurdering af hvilke parametre, der er mest usikre og derfor bør undersøges nærmere.

Eksempel 2: Valg af parametre i GrundRisk Risikovurdering

Valg af interval for parameterusikkerhed

For at undersøge betydningen af usikkerheden af en parameter bør det interval, som parameteren varieres over, være relevant for den lokalitet, der arbejdes på.

På en lokalitet med et magasin med en kendt geologi, nemlig sand (fint), kan man undersøge betydningen af en hydraulisk konduktivitet på hhv. $1 \cdot 10^{-5}$ og $5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Det er ved en kendt geologi mindre relevant at regne på betydningen af andre magasintyper.

Forslag til valg af parameterverdier kan ses i [kapitel 12](#).

Hydrauliske konduktiviteter fra JAGG for forskellige magasintyper:

Magasintype	Hydraulisk konduktivitet (m/s) (interval)
Silt	$1 \cdot 10^{-5}$ $(1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5})$
Sand, fint	$1 \cdot 10^{-5}$ $(1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5})$
Sand, mellemkornet	$5 \cdot 10^{-5}$ $(5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4})$
Sand, groft	$2 \cdot 10^{-4}$ $(2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3})$
Grus	$1 \cdot 10^{-3}$ $(1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2})$



Eksempel 3: Valg af parametre i GrundRisk Risikovurdering

Valg af interval for parameterusikkerhed

For at undersøge betydningen af usikkerheden af en parameter bør det interval, som parameteren varierer over, være relevant for den lokalitet der arbejdes på.

For en lokalitet med et magasin med en mere usikker geologi end i eksempel 2, nemlig sand hvor kvaliteten er ukendt, bør man beregne betydningen af en hydraulisk konduktivitet på hhv. $1 \cdot 10^{-5}$ og $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, dvs. en faktor 100 i forskel.

Hydrauliske konduktiviteter fra JAGG for forskellige magasintyper:

Magasintype	Hydraulisk konduktivitet (m/s) (interval)
Silt	$1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$)
Sand, fint	$1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$)
Sand, mellemkornet	$5 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$)
Sand, groft	$2 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$)
Grus	$1 \cdot 10^{-3}$ ($1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-2}$)



Eksempel 3: Resultat af usikkerhedsvurdering

En faktor 100 i forskel på den hydrauliske konduktivitet giver tilsvarende en faktor 100 i forskel på grundvandshastigheden.

Grundvandshastighed

Fint sand 31,5 m/år

Groft sand 3150 m/år

Grundvandshastigheden påvirker koncentrationen i kontrolpunktet (KP). Fordi en lavere grundvandshastighed vil medføre mindre fortynding af forureningsfluxen og mindre dispersion, og følgende en højere koncentration i kontrolpunktet.

Sensitivitetsanalyse			Koncentration i KP
Hydraulisk konduktivitet	Sand fint	$1 \cdot 10^{-5}$	1,06 µg/L
Hydraulisk konduktivitet	Sand groft	$1 \cdot 10^{-3}$	0,015 µg/L

Andre parametre og modelvalg	
Model	Model 5
Stof	TCE
Nedbrydning	Ingen nedbrydning
Kildekoncentration	10 µg/L
Længde af kilde	10 m
Bredde af kilde	10 m
Infiltration i kildeområde	300 mm/år
Infiltration over fanen	300 mm/år
Mægtighed af grundvandsmagasinet	10 m
Hydraulisk gradient	0,03

TCE's kvalitetskriterium er 1 µg/l.

Rød tekst indikerer en overskridelse.



Eksempel 3: Resultat af usikkerhedsvurdering

TCE's kvalitetskriterium er 1 µg/l. I dette tilfælde viser usikkerhedsvurderingen, at parameterusikkerheden bidrager så meget til usikkerheden på koncentrationen i kontrolpunktet (KP), at det er uklart om kvalitetskriteriet er overskredet.

Det kan derfor anbefales man undersøger konduktiviteten i felten.

Hvis usikkerhedsvurderingen havde vist at koncentrationen i KP var over, eller under kvalitetskriteriet, uanset parametervalg, var det mindre relevant at undersøge denne parameter yderligere.

Sensitivitetsanalyse			Koncentration i KP
Hydraulisk konduktivitet	Sand fint	1 · 10 ⁻⁵	1,06 µg/L
Hydraulisk konduktivitet	Sand groft	1 · 10 ⁻³	0,015 µg/L

Andre parametre og modelvalg	
Model	Model 5
Stof	TCE
Nedbrydning	Ingen nedbrydning
Kildekoncentration	10 µg/L
Længde af kilde	10 m
Bredde af kilde	10 m
Infiltration i kildeområde	300 mm/år
Infiltration over fanen	300 mm/år
Mægtighed af grundvandsmagasinet	10 m
Hydraulisk gradient	0,03

TCE's kvalitetskriterium er 1 µg/l.

Rød tekst indikerer en overskridelse.



Eksempel 4: Valg af parametre i GrundRisk Risikovurdering

Eksempel pba. [case 5](#). I case 5 udføres der usikkerhedsvurderinger for en række parametre.

Dette eksempel er en forenklet version af case 5. Formålet er at illustrere princippet i at anvende usikkerhedsvurderinger til at vurdere, hvilke parametre, som har den største indflydelse på usikkerheden på koncentrationen i kontrolpunktet (KP).

Følgende to parametres betydning undersøges i eksemplet, men der kan undersøges flere, hvis dette er relevant.

Parametre
Højere nedbrydningsrate for TCE
Hurtigere grundvandshastighed



Eksempel 4: Valg af parametre i GrundRisk Risikovurdering

Det at undersøge **betydningen af øget nedbrydning og grundvandshastighed med modelberegninger** kan i nogen situationer bidrage til en mere robust risikovurdering. Det gælder specielt, hvis der er tale om en lokalitet, hvor der tvivl om hvorvidt parametrene gør forskellen i forhold til en overskridelse af kvalitetskriteriet.

I det konkrete tilfælde undersøges det således kun hvordan en **øgning af parametrene påvirker resultatet**, fordi vurderingen er målrettet det at undersøge om der uagtet usikkerhed vedr. parametrene altid vil være en overskridelse af kvalitetskriterierne på lokaliteten.

TCE, cis-DCE og VC's
kvalitetskriterier er hhv.
1 µg/l, 1 µg/l og 0,2 µg/l

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt
Basisscenarium Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	229 µg/L 117 µg/l 32 µg/l

Eksempel 4: Resultat af usikkerhedsvurdering

Usikkerhedsvurdering viser at en højere **nedbrydningsrate bevirker at kvalitetskriteriet for TCE overholdes**, men at det ikke gælder for nedbrydningsprodukterne. En hurtigere grundvandshastighed medfører en reduktion i koncentrationen i kontrolpunktet, men der er fortsat en overskridelse af kvalitetskriteriet.

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Forskel fra basisscenarium
Basisscenarium Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	229 µg/L 117 µg/l 32 µg/l	-
Højere nedbrydningsrate for TCE Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	0,3 µg/L 176 µg/l 78 µg/l	-229 µg/L 59 µg/L 46 µg/L
Hurtigere grundvandshastighed Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	162 µg/L 46 µg/l 6,9 µg/l	-67 µg/L -71 µg/L -25 µg/L



Eksempel 4: Resultat af usikkerhedsvurdering

Usikkerhedsvurdering viser at en højere **nedbrydningsrate bevirker at kvalitetskriteriet for TCE overholdes**, men at det ikke gælder for nedbrydningsprodukterne. En hurtigere grundvandshastighed medfører en reduktion i koncentrationen i kontrolpunktet, men der er fortsat en overskridelse af kvalitetskriteriet.

Scenarie	Koncentration i kontrolpunkt	Forskel fra basisscenarium
Basisscenarium Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:		-
Højere nedbrydningsrate Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	0,3 µg/L 176 µg/l 78 µg/l	-229 µg/L 59 µg/L 46 µg/L
Hurtigere grundvandshastighed Trichlorethylen: cis-1,2-Dichlorethylen: Vinylchlorid:	162 µg/L 46 µg/l 6,9 µg/l	-67 µg/L -71 µg/L -25 µg/L

Herefter kan man undersøge betydningen af at øge begge parametre samtidig
Hvad får du?
Er der fortsat en overskridelse af kvalitetskriteriet?



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Parameterliste

Alfabetisk gennemgang af parametre og inputs

Kapitel 12



Alfabetisk parameterliste (1/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Kort beskrivelse	Bestemmelse af parameter
Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin	Z_v	m	1, 2, 3	Dette er afstanden fra bunden af kilden til toppen af det førstkommende grundvandsmagasin	Vurderes ud fra forureningsundersøgelsen samt tykkelsen af dæklaget (lerlaget). Lerlagstykkelser til brug for model 1 og 2 kan vurderes ud fra dybe boringer i nærheden, ud fra dæklagskort eller geologiske modeller for området. Se også slide 201
Bredde af kilde	L_y	m	1, 2, 3, 5	Udbredelsen af kildeområdet på tværs af grundvandets strømningsretning	Vurderet ud fra forureningsundersøgelsen Se også slide 201
Bulk hydraulisk konduktivitet	K_b	m/s	2	Dette er den samlede hydrauliske konduktivitet for sprækker og matrix. Se også slide 201	Standardværdi i GrundRisk er baseret på worst case parametre fra Jørgensen al. (2008). Bemærk at der enten indtastes en bulk hydraulisk konduktivitet eller en sprækkeapertur i modellen. Den parameter der ikke indtastes beregnes af de øvrige input.
Grundvandshastighed	u	m/år	1, 2, 3, 4, 5	Porevandshastigheden i grundvandsmagasinet	Grundvandshastigheden kan enten indtastes direkte eller beregnes baseret på indtastede værdier for hydraulisk konduktivitet K , hydraulisk gradient i og porøsitet n .

$$u = \frac{K \cdot i}{n}$$



Alfabetisk parameterliste (2/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Uddybende forklaring	Bestemmelse af parameter
Grænseradius, hvor koncentrationen antages lig nul	r_2	m	4	<p>Den afstand fra centrum af kilden hvor koncentrationen kan antages at være nul.</p> <p>Denne værdi skal kun angives hvis der ikke sker nedbrydning.</p>	Vurderes ud fra forureningsundersøgelsen
Hydraulisk konduktivitet	K	m/s	1, 2, 3, 4, 5	<p>Den hydrauliske ledningsevne i magasinet. Antages at være konstant over tid og sted. Denne parameter skal kun angives, hvis det vælges at beregne grundvandshastigheden i GrundRisk.</p> <p>K kan variere meget i tid og sted. Den anvendte værdi skal repræsentere grundvandsmagasinet fra forureningskilde og ned til det valgte kontrolpunkt</p>	<p>K kan fastsættes både ud fra feltundersøgelser eller litteratur.</p> <p>Der er indbygget standardværdier for K og porøsitet i GrundRisk for 3 typer af grundvandsmagasiner baseret på et litteraturstudie (Miljøstyrelsen, 2016c).</p> <p>Derudover kan der søges inspiration i JAGGs hydrauliske konduktiviteter for forskellige magasintyper.</p> <p>Se slide 203.</p>
Hydraulisk gradient	i	-	1, 2, 3, 4, 5	<p>Trykgradienten i grundvandsmagasinet. Denne parameter skal kun angives, hvis det vælges at beregne grundvandshastigheden i GrundRisk.</p>	Den hydrauliske gradient fastsættes på baggrund af synkronpejlinger eller ud fra eksisterende potentialekort for grundvandsmagasinet



Alfabetisk parameterliste (3/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Uddybende forklaring	Bestemmelse af parameter
Infiltration i kildeområde	I_{kilde}	mm/år	1, 2, 3, 5	Infiltration til grundvandet i kildeområdet	Infiltrationen til magasinet kan baseres på: 1) en lokal hydrologisk model for området 2) DK-modellen (værdien fås fra GrundRisk Screening) 3) JAGGs kommunebaserede nettonedbør Se slide 202
Infiltration over fanen	I_{fane}	mm/år	1, 2, 3, 4, 5	Infiltration til grundvandet over fanen. I Model 3 skal I_{kilde} og I_{fane} have samme værdi.	Se ovenfor
Kapillarzonens dybde	f	m	4	Det område lige over grundvandet som er vandmættet pga. kapillærkræfterne, der får vandet til at stige op over grundvandsspejlet.	Baseres på litteraturværdier. Det anbefales at bruge de mest konservative værdier. Se slide 204
Kildekoncentration	C_0	µg/L	1, 2, 3, 4, 5	Den angivne kildekonzentration skal repræsentere det valgte kildeområde	Vurderes ud fra forureningsundersøgelsen Se slide 204
Longitudinal dispersivitet (x-retning) horisontal transport	α_L	m	1, 2, 3, 4, 5	Dispersion langs med strømningsretningen i grundvandsmagasinet (den horisontale transport model). Antages at være konstant over tid og sted	En standardværdi på 1 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på litteraturstudie (Miljøstyrelsen 2016b).
Longitudinal dispersivitet (z-retning) vertikal transport	$\alpha_{L,v}$	m	1, 3	Dispersion langs med strømningsretningen i den vertikale transport model. Antages at være konstant over tid og sted	En standardværdi på 0,1 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på Miljøstyrelsen (2017).



Alfabetisk parameterliste (4/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Uddybende forklaring	Bestemmelse af parameter
Længde af kilde	L_x	m	1, 2, 3, 5	Udbredelsen af kildeområdet langs med grundvandets strømningsretning	Vurderes ud fra forureningsundersøgelsen Se slide 201
Mægtighed af grundvandsmagasin	d	m	1, 2, 3, 4, 5	Dybden af grundvandsmagasinet fra top til bund. Dybden af magasinet er afgørende for om beregningen foretages som 3D eller 2D. Se slide 205	Bestemmes ud fra dybe borer i området (Jupiterdatabasen) eller baseret på hydrogeologisk model for området. Se også slide 205
Porøsitet i dæklag	ϵ	-	1, 2, 3, 4	Porøsiteten i den vertikale transportmodel. Antages at være konstante over tid og sted	GrundRisk har indbygget standardværdier for porøsiteter for forskellige jordtyper samt intervaller de kan variere over Se slide 206
Porøsitet i grundvandsmagasin	n	-	1, 2, 3, 4, 5	Porøsiteten i den horisontale transportmodel. Antages at være konstant over tid og sted	Porøsiteter for 3 typer af grundvandsmagasiner samt et interval de kan variere over er indbygget i GrundRisk Se slide 206
Radius af kildeområde	r	m	4	Kildeområde antages cylinderformet i Model 4 og fra start strækker sig helt ned til grundvandsmagasinet	Vurderes ud fra forureningsundersøgelsen. Se også slide 201



Alfabetisk parameterliste (5/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Uddybende forklaring	Bestemmelse af parameter
Sprækkeafstand	2B	m	2	<p>Betegner den indbyrdes afstand mellem de vertikale sprækker i moræneleren. Sprækkerne antages at være gennemgående i hele moræneleren.</p> <p>Modellen er begrænset til gennemsnitlige sprækkeafstande i intervallet fra ca. 1 - 5 m. For sprækkeafstande < 0,4 m kan Model 1 anvendes.</p>	<p>En standardværdi på 5 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på worst case parametre for reduceret opsprækket moræneler fra Jørgensen et al. (2008).</p>
Sprækkeapertur	2b	m	2	<p>Betegner vidden af sprækken</p>	<p>En standardværdi på $7,9 \cdot 10^{-5}$ m er indsat som defaultværdi i GrundRisk, baseret på worst case parametre for reduceret opsprækket moræneler fra Jørgensen et al. (2008).</p> <p>Bemærk at der enten indtastes en bulk hydraulisk konduktivitet eller en sprækkeapertur i modellen. Den parameter der ikke indtastes beregnes af de øvrige input.</p>



Alfabetisk parameterliste (6/6)

Parameter	Parameter symbol	Enhed	Bruges i model	Uddybende forklaring	Bestemmelse af parameter
Transversal dispersivitet (y-retning) Horisontal transport	α_T	m	1, 2, 3, 4, 5	Dispersion på tværs af grundvandetets strømningsretningen Antages at være konstant over tid og sted	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på litteraturstudie (Miljøstyrelsen 2016b).
Transversal dispersivitet (y-retning) Vertikal transport	$\alpha_{T,v}$	m	3	Dispersion på tværs af porevandetets strømningsretningen i den vertikale model. Antages at være konstant over tid og sted	En standardværdi på 0,01 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på Miljøstyrelsen (2017).
Vandindhold	V_v	-	3, 4	Vandfyldt porøsitet. Bemærk at V_v altid skal være mindre end porøsiteten i dæklaget, ϵ . Antages at være konstant over tid og sted.	GrundRisk har indbygget standardværdier for vandindhold for forskellige jordtyper baseret på værdier i JAGG Se også slide 206
Vertikal dispersivitet (z-retning) horisontal transport	α_v	m	1, 2, 3, 4, 5	Den vertikale dispersion i grundvandsmagasinet. Antages at være konstant over tid og sted	En standardværdi på 0,005 m er indsat som defaultværdi i GrundRisk baseret på litteraturstudie (Miljøstyrelsen 2016b). Se også slide 207
1. ordens nedbrydningsrate (aerobe/anaerob forhold)	k_v (dæklag) k (magasinet)	d^{-1}	1, 2, 3, 4 1, 2, 3, 4, 5	Om nedbrydning medtages eller ej bør altid bygge på en faglig begrundelse. Nedbrydningsraterne antages at være konstante over tid og sted	For den horisontale transport i GrundRisk foreslås anbefalede nedbrydningsrater fra Miljøstyrelsen (2018b) samt vises et spænd de kan variere over (min – middel - max). For de vertikale modeller indsættes som default den anbefalede anaerobe nedbrydningsrate.



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Afstand fra kilde til top af grundvandsmagasin, Z_v

Hvis der ikke forelægger en geologisk model for forureningslokaliteten, kan man benytte den nationale boringsdatabase (Jupiter) til at finde oplysninger om geologien baseret på de nærmeste boringer.

Kildebredde, L_y , kildelængde, L_x og radius, r

Det er vigtigt at kildekonzentration er repræsentativ for det forurenede kildeareal, der anvendes i risikovurderingen. Det er derfor vigtigt, at man gør sig nogle overvejelser i forhold til sammenhængen imellem stofkoncentration og angivet længde og bredde/radius af kilden. Længden (L_x) er altid langs grundvandsstrømningen.

Bulk hydraulisk konduktivitet, K_b

Valget af sprækkeparametre og infiltration påvirker den vertikale hydrauliske gradient i systemet samt vandets flowhastighed gennem sprækken. For at undersøge, om de valgte parametre giver mening, kan det undersøges, om den beregnede værdi for bulk hydraulisk konduktivitet K_b ligger indenfor de forventede værdier for lavpermeable opsprækkede aflejringer i Danmark. Bulk hydraulisk konduktivitet for moræneler ligger generelt i intervallet $10^{-6} - 10^{-9}$ m/s for de øverste 10 – 15 m af lerlagene (Jørgensen et al. 2008).



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Infiltration i kildeområde, I_{Kilde} og over fanen, I_{Fane}

Infiltrationen på lokaliteten kan vurderes på forskellige baggrunde

1. Såfremt der foreligger en lokal hydrologisk model for området, kan der tages udgangspunkt i infiltrationen til grundvandsmagasinet bestemt med denne. Denne vil i langt højere grad end de nedenstående metoder tage højde for de lokale forhold, der påvirker infiltration såsom topografien.
2. Hvis der er udført en screening med GrundRisk for lokaliteten, kan den anvendte infiltration fra screeningen benyttes. Denne er bestemt med DK-modellen som infiltrationen til det førstkomende betydende grundvandsmagasin (Miljøstyrelsen, 2016c). Det er dog vigtigt at bemærke, at screeningen opererer med en minimumsværdi på 100 mm/år. Er infiltrationen i DK-modellen således negativ, nul eller mindre end 100 mm/år, anvendes minimumsværdien på 100 mm/år ud fra et forsigtighedsprincip (Miljøstyrelsen, 2018a). Yderligere skal man være opmærksom på, at DK-modellens opløsning gør, at der er en vis usikkerhed ved at anvende værdierne på lokal skala. Der bør også i risikovurderingen anvendes minimum 100 mm/år med mindre man har viden om at infiltrationen på lokaliteten er lavere.
3. Nettonedbør fra JAGG (kommunebasis). Disse værdier er ligeledes gennemsnitlige værdier for større områder og afspejler ikke nødvendigvis de lokale forhold på en lokalitet. Se slide 45 for en uddybende forklaring på forskel på Nettonedbør og infiltration.



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Hydraulisk konduktivitet af grundvandsmagasinet, K

K kan bestemmes i felten ved eksempelvis slugtests, pumpetests og på baggrund af sigteanalyser.

GrundRisk inkluderer standardværdier samt intervaller for sand og kalk (se tabel 1 nedenfor). JAGG indeholder hydrauliske konduktiviteter for forskellige typer af sand samt silt og grus, som der også kan tages udgangspunkt i (se tabel 2 nedenfor).

Generelt udviser hydrauliske konduktiviteter stor rumlig variation og kan over korte afstande variere flere størrelsesordener. De anvendte hydrauliske konduktiviteter i GrundRisk skal repræsentere strækningen af grundvandsmagasinet fra lokaliteten til kontrolpunktet, der som standard er sat til 100 m nedstrøms. Der skal derfor benyttes gennemsnitlige værdier, der kan repræsentere større områder.

Magasintype	Hydraulisk konduktivitet (m/s) (interval)
Kvartært sand	$1 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-3}$)
Prækvartært sand	$1 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-4}$)
Opsprækket kalk	$1 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-3}$)

Tabel 1. GrundRisk standardværdier og intervaller for hydrauliske konduktiviteter for grundvandsmagasiner (Miljøstyrelsen 2016c):

Magasintype	Hydraulisk konduktivitet (m/s) (interval)
Silt	$1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$)
Sand, fint	$1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$)
Sand, mellemkornet	$5 \cdot 10^{-5}$ ($5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$)
Sand, groft	$2 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$)
Grus	$1 \cdot 10^{-3}$ ($1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-2}$)

Tabel 2. Hydrauliske konduktiviteter fra JAGG for forskellige magasintyper:



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Kapillarzonens dybde, f

Den kapillære stighøjde vil typisk være større jo mere finkornet materiale, der er tale om. Des større kapillarzonens dybde f er i modellen, jo lavere bliver den modellerede koncentration i grundvandsmagasinet. Dette skyldes, at koncentrationsgradienten mellem toppen og bunden af kapillarzonen ($\Delta C/f$) bliver mindre når f øges. Dette resulterer i en lavere diffusionsstyret forureningsflux fra den umættede zone til grundvandsmagasinet. Af de angivne litteraturværdier i tabellen nedenfor, vil værdierne baseret på US EPA (2004) derfor være de mest konservative værdier.

Geologi	Dybde af kapillarzone (m) (Shen et al. 2013)	Dybde af kapillarzone (m) (US EPA, 2004)
Sand	0,32	0,17
Leret sand (loamy sand)	0,47	0,19

Dybde af kapillarzone for sand og leret sand baseret på Shen et al. (2013) og US EPA (2004)

Kildekoncentration, C_0

Kildekoncentrationen vil typisk være en grundvandskoncentration målt i et sekundært magasin eller i sandlirer i moræneler. Kildekoncentrationer kan også estimeres på baggrund af jordkoncentrationer eller poreluftkoncentrationer og omregnes ved hjælp af fugacitetsberegninger i JAGG-værktøjet.

Kildekoncentrationen skal repræsentere koncentrationen i det valgte kildeområde. Såfremt datagrundlaget er sparsomt kan der tages udgangspunkt i de højst målte koncentrationer. Ved større datagrundlag kan der anvendes gennemsnitlige koncentrationer indenfor det afgrænsede kildeområde.



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Mægtighed af grundvandsmagasin, d

Mægtigheden af grundvandsmagasinet har betydning for spredningen af forureningsfanen over dybden. For tynde magasiner (få meters tykkelse) vil fanens spredning over dybden være begrænset nedadtil. Mægtigheden af grundvandsmagasinet vil derfor have betydning for, om beregningen i den horisontale transportmodel foretages som 2D model med fuld opblanding over dybden (og dermed ensartet koncentration over dybden) eller som 3D model, hvor fanen frit kan spredes over dybden. Se slide [56](#) for en uddybende forklaring.

For kalkmagasiner og lignende magasiner, hvor strømningen hovedsageligt er knyttet til transport i den øvre opsprækkede del af den samlede dybde (den hydraulisk aktive del), er det den hydraulisk aktive dybde af magasinet, der skal anvendes.



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Porøsitet for hhv. dæklag, ϵ og grundvandsmagasinet, n

Standardværdier samt intervaller for porøsiteter grundvandsmagasinet er fastlagt baseret på et litteraturstudie udført af Geus (Miljøstyrelsen, 2016c) og ses af tabel 1. Standardværdier for porøsiteter anvendt for den vertikale transport ses af tabel 2 nedenfor og bygger ligeledes på et litteraturstudium (Miljøstyrelsen, 2016c).

Vandindholdet, V_v

Vandindholdet er baseret på værdier i JAGG (se tabel 2). Der er dog foretaget en omregning i forhold til porøsiteternes størrelse i GrundRisk, således at den andel af porevoluminet der udgøres af vand svarer til den i JAGG, selvom porøsiteterne kan afvige fra JAGGs værdier.

Magasintype	Porøsitet, n (interval)
Kvartært sand	0,30 (0,25-0,4)
Prækvartært sand	0,30 (0,25-0,4)
Opsprækket kalk	0,05 (0,001-0,15)

Tabel 1.

GrundRisk standardværdier og intervaller for porøsiteter for grundvandsmagasiner (Miljøstyrelsen 2016c):

Jordtype	Porøsitet, ϵ (interval)	Vandindhold, V_v (interval)*
Fed ler	0,40 (0,3-0,6)	0,30 (0,2-0,4)
Moræneler, sandet ler, st. siltet ler, ler (uspecificeret)	0,25 (0,1-0,3)	0,2 (0,125-0,25)
Sand	0,30 (0,25-0,4)	0,1 (0,03-0,23)
Silt (morænesilt)	0,40 (0,35-0,5)	0,3 (0,2-0,4)
Sand og grus (usorteret)	0,25 (0,15-0,35)	0,2 (0,03-0,19)

*Vandindhold anvendes kun i Model 3 og 4.

Tabel 2.

GrundRisk standardværdier og intervaller for porøsiteter og vandindhold anvendt i de vertikale modeller (Miljøstyrelsen 2016c & JAGG).



Uddybende beskrivelser af parametre/parameterfastsættelse

Vertikal dispersivitet, α_v , og transversal dispersivitet, α_T

Ligesom de øvrige dispersiviteter, er disse baseret på et litteraturstudium udført af DTU (Miljøstyrelsen, 2016b). Modelresultaterne er meget følsomme over for disse dispersiviteter, så der er valgt konservative standardværdier, som giver en begrænset spredning af forureningsfanen på tværs af strømningsretningen.

1. ordens nedbrydningsrate (aerobe/anaerobe forhold) k_v og k

Såfremt nedbrydning tilvælges under den **vertikale transport** i beregningen, vil den anbefalede anaerobe nedbrydningsrate (Miljøstyrelsen, 2018b) blive indsat som standard. Bemærk at dette ikke altid er det mest konservative valg, da visse stoffer fx en del chlorerede opløsningsmidler har højere anaerobe rater end aerobe rater. Det er derfor altid nødvendigt, at brugeren forholder sig til den rate, der anvendes i beregningen, og tilpasser den efter behov.

Under indtastningsfelterne tilhørende den **horisontale transport** kan anaerobe og aerobe anbefalede nedbrydningsrater for det valgte stof ses. Endvidere ses minimums-, maksimums- og middelværdien af nedbrydningsraterne fundet ved litteraturstudiet i Miljøstyrelsen (2018b)



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Referencer

Kapitel 13



Referencer og baggrundsmateriale

- Bjerg, P.L. (2021). IV Transport og stofspreddning. Undersøgelsesmetoder og risikovurdering. Efteruddannelseskursus for Region Hovedstaden. November 2021.
- Chambon, J.C., Binning, P.J., Jørgensen, P.R., Bjerg, P.L., (2011). A risk assessment tool for contaminated sites in low - permeability fractured media. Journal of Contaminant Hydrology. 124 (1-4), 82-98.
- Jørgensen, P.R., Klint, K.E. Mølgaard, M.R. (2008). SprækkeJAGG. Regneark til risikovurdering af sprækker i moræneler. Teknik og Administration, Nr. 2 2008. Videnscenter for Jordforurening.
- Miljøstyrelsen (2016a). JAGG 2 - Vertikal transport ned til førstkomende betydende magasin. Miljøprojekt nr. 1828, 2016. Christensen, A.G., Binning, P.J., Troldborg, M., Kjeldsen, P., Broholm, M. (red.).
- Miljøstyrelsen (2016b). GrundRisk. Beregningsmodel til risikovurdering af grundvandstruende forureninger. Rettet udgave. Miljøprojekt nr. 1865. Rosenberg, L., Søndergaard, G.L., Binning, P.J., Aabling, J., Bjerg, P.L. (red.).
- Miljøstyrelsen. (2016c). Metode til at estimere lertykkelse under jordforureninger, der er kortlagt på V1 og V2. Miljøprojekt 1888, 2016. Kallesøe, A.J., Molander, J., Ditlefsen, C.B., Troldborg, L., Wiese, M.B., Klint, K.E.S. (red.).
- Miljøstyrelsen (2017). GrundRisk - Coupling of vertical and horizontal transport models. Miljøprojekt nr. 1915. Located by Rosenberg, L., Bjerg, P. L., & Binning, P. J. (red.).



Referencer og baggrundsmateriale

- Miljøstyrelsen (2018b). Nedbrydningsrater til brug i GrundRisk Risikovurdering - Litteraturstudie. Miljøprojekt nr. 2013. Ottosen, C. B., Bjerg, P. L., Broholm, M. M., & Søndergaard, G. L. (red.).
- Miljøstyrelsen (2019). Afprøvning af GrundRisk Risikovurdering. Pesticidpunktkilder. Miljøprojekt nr. 2105. Gitte L. Søndergaard (red.).
- Miljøstyrelsen (2021a). GrundRisk systembeskrivelse Oversigt over den funktionalitet samt data og standardværdier, der er indeholdt i GrundRisk. Maj 2021.
- Miljøstyrelsen (2021b). GrundRisk Risikovurdering. Gennemgang af værktøjet og vejledning til den praktiske anvendelse af værktøjet. Rambøll, DTU Miljø, Miljøstyrelsen, Udkast januar 2021.
- Shen, R., Pennell, K.G., Suuberg E.M. (2013). Influence of soil moisture on soil gas vapor concentration for vapor intrusion. Environmental Engineering Science, 30 (10), 628-637.
- US EPA (2004). User's Guide for Evaluating Subsurface Vapor Intrusion Into Buildings. Revised February 22, 2004.