



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Ny konceptuel forståelse af forureningstransport i regionale sandmagasiner

Optimering af undersøgelses- strategier og metoder

Miljøprojekt nr. 2095

Juli 2019

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Thomas Hauerberg Larsen, Orbicon

Lars Larsen, Orbicon

Mads Georg Møller, Orbicon

Sine Thorling Sørensen, Region Hovedstaden

Niels Døssing Overheu, Region Hovedstaden

ISBN: 978-87-7038-092-8

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Resume	5
2.	Summary	7
3.	Baggrund	9
4.	Formål	10
4.1	Projektets afgrænsning	10
4.2	Projektets indhold og rapportens opbygning	11
5.	Detaljeret beskrivelse af problemstillingen	13
5.1	Definition af et dybt regionalt sandmagasin	13
5.2	Eksempler på forskellige dykkende forureningsfaner, og faner der ikke dykker væsentligt	13
5.2.1	Birkerød Kongevej 158	13
5.2.2	Ravnsbjergvej 1	15
5.2.3	Kærhøjgårdsvej 46	17
5.2.4	Birkerød Industri kvarter (Hammerbakken 10)	18
5.3	Dannelsesmiljøer for regionale sandmagasiner i Danmark	19
5.3.1	Geologisk ramme	19
5.4	Identifikation og beskrivelse af styrende forhold og parametre	23
6.	Beregningsmodel for simulering af strømning i et sandmagasin	25
6.1	Rammer for modelopsætning	25
6.2	Modelopsætning og kalibrering	25
6.3	Kørsel af model med teoretiske scenarier	29
6.3.1	Basisscenarie	29
6.3.2	Effekt af anisotropi	30
6.3.3	Effekten af oppumpning	32
6.3.4	Effekt af placering af filter i dybden	35
6.3.5	Effekt af højpermeable lag i lagfølgen	36
6.3.6	Effekt af barrierer i lagfølgen	39
6.3.7	Effekt af en højpermeabel zone på tværs af strømningsretningen	40
6.3.8	Effekt af ændrede nedsivningsforhold i kildeområdet	41
6.3.9	Effekt af reduceret højde ved udløbet i recipient	43
6.3.10	Effekt af længden af domænet	43
6.4	Evaluerings af resultater af kørsler/scenarier	44
6.4.1	Væsentligste konklusioner fra modellen	44
6.4.2	Modelresultater set ift. de tidligere beskrevne eksempler	45
6.4.2.1	Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Birkerød Kongevej 158	45
6.4.2.2	Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Ravnsbjergvej 1	46
6.4.2.3	Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Kærhøjgårdsvej 46	46
6.4.2.4	Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Hammerbakken 10	49
7.	Undersøgelsesværkøjer og metoder til kortlægning af parametre i sandmagasiner	51

7.1	Indledende overvejelser	51
7.2	Boringsmetoder mm.	52
7.3	Hydraulisk ledningsevne	52
7.3.1	Anisotropi mht. hydraulisk ledningsevne i sandmagasiner	53
7.3.1.1	Småskala anisotropi	53
7.3.1.2	Storskala anisotropi	53
7.3.2	Metoder til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne	54
7.3.2.1	Pumpetests	54
7.3.2.2	Slug tests	54
7.3.2.3	Kornstørrelsesanalyser	55
7.3.2.4	Flowmetertest (permeameter)	56
7.3.2.5	HPT (Hydraulic Profiling Tool)	57
7.3.2.6	Borehulslogging	57
7.3.2.7	Ellogboring	58
7.3.2.8	Andre Geofysiske metoder	58
7.3.2.9	Point Velocity Probe	58
7.3.2.10	Tracerforsøg	59
7.3.3	Sammenligning af metoder	59
7.3.3.1	Permeameter, kornstørrelsesanalyse og slugtests	60
7.3.3.2	Laserdiffraktion/ hydrometerforsøg	60
7.4	Horisontal og vertikal gradient	61
8.	Databehandling	63
9.	Konklusioner og anbefalinger	66
10.	Litteraturliste	69

1. Resume

I forbindelse med forureningsundersøgelser af særligt chlorerede opløsningsmidler i sandmagasiner med mægtighed større end 10 m er det konstateret, at fanerne i nogle tilfælde dykker væsentligt mere end umiddelbart forventet.

Fænomenet er søgt belyst ved modellering i en syntetisk matematisk strømningsmodel, der simulerer transporten i sandmagasiner på regional skala. En række parametre er belyst ved modelleringen ud fra indledningsvist opstillede teser. Det drejer sig om:

1. Betydning af tilstedeværelse af mere høppermeable zoner dybere i magasinet.
2. Betydning af hvor kilden til forureningen er placeret i forhold til vandskel.
3. Betydning af anisotropi mellem vertikal og horisontal ledningsevne.
4. Betydning af pumpning i større afstand (svarende til almindelig vandindvinding.)
5. Betydning af barrierer i magasinet (områder hvor ledningsevnen reduceres)
6. Betydning af nedsivningsforhold i kildeområdet.
7. Betydning af størrelsen af magasin (længde og mægtighed).

Ved analysen viste det sig, at særligt forholdene 1, 2, 5 har en stor betydning for hvor meget opløst stof vil dykke ned i magasinet under transporten. Øget lokal infiltration (6) øger også tendensen til at det opløste stof dykker. Modelleringen viste også, at de beregnede vertikale gradienter, der forårsager de dykkende faner, i praksis vil være svære/umulige at måle.

De opnåede resultater i modellen er anvendt i forklaringen af observationer i en række præ-senterede eksempler.

Med baggrund i, at tilstedeværelsen af forskelle i den vertikale fordeling af hydraulisk ledningsevne er en af de væsentlige faktorer, der styrer om en fane dykker, er forskellige muligheder til at vurdere dette samlet. Der er både gennemgået generelle dannelsesmodeller for de geologiske opbygninger af sandmagasiner samt beskrevet metoder for, hvordan man i felten kan bestemme fordelingen af ledningsevner over dybden.

På baggrund af analysen er der givet en række anbefalinger til, hvordan man overordnet kan tilrettelægge undersøgelser i de mere mægtige sandmagasiner. Disse kan sammenfattes i:

- Start med at "zoome" ud. Hvordan er kildens placering ift. vandskel? Er der synlige barrierer nedstrøms kilden i afstande på 1500 m eller mindre? Er der beskrivelser fra dannelsesgeologi eller boreprofiler fra dybe borer, der beskriver variationer i kornstørrelse og hermed hydraulisk ledningsevne?
- Er der informationer om faskiner el. lign., der kan betinge lokal forøget nedsivning.
- Hvis der er en væsentlig sandsynlighed for at fanen kan dykke, så udfør mindst én dyb boring nedstrøms kildeområderne til bunden af sandmagasinet. Tag prøver til analyse af kornstørrelsesfordelingen igennem magasinet og anvend dem til beregning af fordelingen af ledningsevnen over dybden. Informationerne kan også bruges til dimensionering af gruskastning af evt. filtre.
- HPT (Hydraulic Profiling Tool) er et glimrende værktøj til bestemmelse af den vertikale fordeling af ledningsevne, der med fordel kan anvendes. Ulempen er at metoden typisk er vanskelig at udføre i stor dybde, hvilket ofte er nødvendigt.
- Kombiner gerne analysen af variationen af ledningsevnen over dybden fra kornstørrelsesfordelingen med egentlige pumpeforsøg, med observation i dedikerede observationsfiltre i forskellig afstand og dybde.

Den efterfølgende fortolkning af data og interpolation illustrerer en ekstra usikkerhed ved beregning af fx flux, udover det der introduceres ifbm. selve målingen og fx den skala data repræsenterer. Vær opmærksom på dette og udnyt så meget viden som muligt omkring korrelation mellem lag mm. Sammenfattende er usikkerheden knyttet til behandlingen dog mindre end til indhentning af de stedsvariable data som hydraulisk ledningsevne mm.

2. Summary

It has been observed that the dissolved plumes tend to dive more than expected in some cases performing site investigations of especially chlorinated solvents in mighty sandy aquifers with a saturated height of more than 10 m.

This phenomenon has been investigated by simulation in a ground water transport model mimicking the plume transport on a regional scale. Governing factors were tested in the model based on different initial theses. A list is given below:

1. Importance of deeper higher permeable layers in the aquifer.
2. Importance of the placement of the source with respect to the water divide.
3. Importance of anisotropy between vertical and horizontal hydraulic conductivity.
4. Importance of water abstraction in the aquifer relatively far downgradient of sources.
5. Importance of barriers in the aquifers (areas where lower permeability exists).
6. Importance of the local infiltration rate (ie. are there soakaways present).
7. Importance of the aquifer size (length and thickness).

The analysis showed that especially the factors 1, 2 and 5 had a significant importance on the shape and the depth of the plume downstream the source. Increased infiltration (6) also increases the depth of the dissolved plume.

The obtained results were discussed in relation to several case studies in the report pointing at the most predominant cause for diving of the plumes in the different cases.

As one of the significant factors whether the plume dives are the vertical distribution of the hydraulic conductivity different methods to obtain that data are described. Both geological genesis models for the aquifers as well as more empirical methods to obtain information about vertical distribution of hydraulic conductivities are described in the work.

Based on the total work we give some recommendations to how one can plan site investigations in mighty sand aquifers. Recommendations are:

- Start by zooming out from the site itself. How is the site situated with respect to water divides? Are there any visual barriers visible in the landscape within 1500 m downgradient of that can affect the cross section of flow in the sand aquifer? Does any description of the overall geological genesis exist for the area or are there information from deep wells in the surrounding that gives information about the vertical distribution of the hydraulic conductivity?
- Check if there are any information about a higher local infiltration than the surroundings (like soakaways near the source area)?
- If there is a relatively high probability of the plume diving then at least one well/boring should be taken to the bottom of the sand aquifer downstream the source zone. Samples of the geologic material should be obtained for grain size analysis. Grain size analysis curves can be related to the hydraulic conductivity using for example the "HydroSieveXL" tool thereby getting information about the vertical distribution of the hydraulic conductivity. Grain size analysis also support the decision of which packing material should be used installing screens.
- HPT (Hydraulic Profiling Tool) is an excellent tool to determine the distribution of hydraulic conductivity over depth. The disadvantage of the tool is that the penetration depth is limited (normally less than 30 m), which in some cases is not enough.

- Combination of determination of hydraulic conductivities from grain size analysis and determination of transmissivities from pumping tests carried out with observation screens in different depths and distances from the pumping well gives even better information about the hydraulic properties of the aquifer.

Interpretation and interpolation of data illustrates additional uncertainty to calculation of Q mass fluxes beyond the uncertainty from the measurement itself. Have attention to that and use all information in the data about correlation of e.g. grain size across a transect in order to decrease uncertainty.

3. Baggrund

I de seneste år har stofudbredelse i forureningskildeområder, særligt i forhold til fri fase spredning af chlorerede opløsningsmidler, haft stor fokus, og med god grund. Forureningsfaners udbredelse og opførsel har ikke nydt den samme bevågenhed til trods for, at en stor andel af massen (10-90 %) oftest befinder sig i fanen afhængig af geologi, spildets alder og de hydrologiske forhold i og omkring forureningskilden.

Baseret på en række iagttagelser af forureningsfaner viser der sig ofte et overordentligt kompliceret spredningsmønster, selv i det man umiddelbart ville betragte som relativt homogene sedimenter som vores større sandmagasiner med stor mægtighed i højden. Observationerne relaterer sig til faner, der dykker langt mere end forventet, og faner som i visse tilfælde ikke bevæger sig helt som den overordnede strømningsretning. Fx observeres, at fanerne bevæger sig mere skråt i forhold til den overordnede strømningsretning. Umiddelbart har dette størst interesse for stoffer med langsomme omsætningsrater som de chlorerede stoffer, MTBE, benzen og en række pesticider, der under givne redoxbetingelser kan observeres langt fra de oprindelige kildeområder. Eksempelvis kan nævnes at forureningsfanerne med PCE i Rødekro, benzen i Gørding, TCE i Veksø, MTBE og benzen i Birkerød, PCE i Vassingerød, alle er eksempler på spredning af faner til stor dybde og/eller afstand, hvor forventningen til forureningsfanens udbredelse og transportveje var anderledes end forventet. Potentielt set kan en række forureninger være vurderet nedbrudt/og eller ikke kommet længere, hvis borerne enten ikke har været filtersat tilstrækkelig dybt eller i den egentlige strømningsretning/transportretning for forureningsfanen, hvilket kan give fejlslutninger omkring risiko og behov for afværgeindsats.

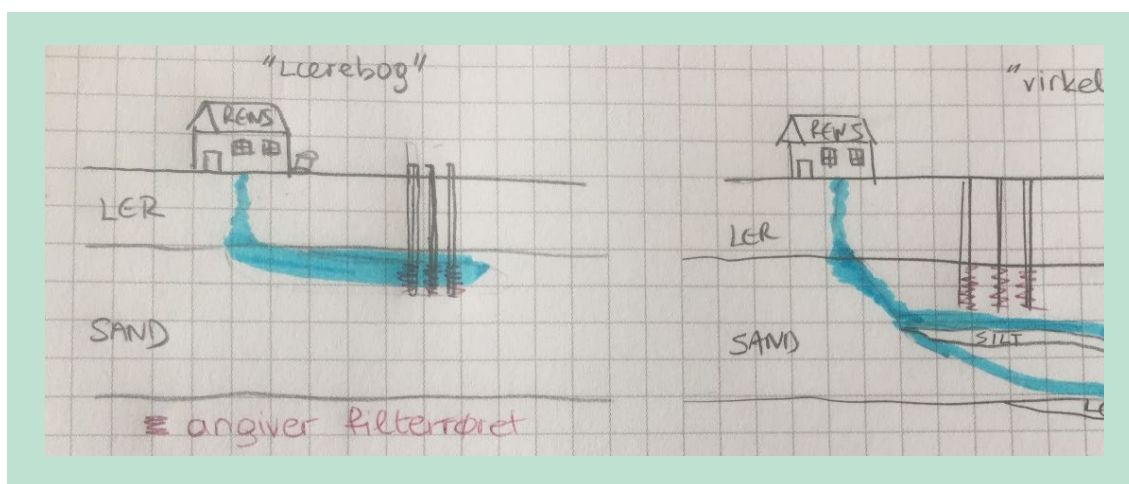
Den umiddelbare overordnede forklaring på de observerede spredningsfænomener forventes at være den rumlige fordeling af hydraulisk ledningsevne. Herudover kan en række andre faktorer som bl.a. pumpning ifm. indvinding, infiltrationens lokale størrelse ved kilden også spille en rolle. Fordelingen af den hydrauliske ledningsevne er korreleret til energiniveauet for vandet under de oprindelige aflejringsforhold. I Danmark er der typisk tale om glaciofluviale aflejringer. Vandhastigheden ved gletsjerafsmeltningen styrede således både kornstørrelsen og retningsændringerne i det oprindeligt aflejrede materiale, der kan være opbygget af mange sekvenser i den fulde mægtighed af magasinet.

Den rumlige forståelse af placeringen af høj- og lavpermeable aflejringer, herunder deres størrelse og orientering i forhold til hinanden forventes at have den største betydning i forståelsen af mulige spredningsveje for forureningen og dermed både for tilrettelæggelse af undersøgelser, for risikovurderingen, og ultimativt for hvordan en evt. oprensning skal foregå.

4. Formål

Formål med projektet er at forbedre den konceptuelle forståelse af forureningstransport i sandmagasiner med stor mægtighed. En bedre forståelse vil på sigt forbedre undersøgelsesstrategierne, dokumentationen og risikovurderingen i vores forureningsundersøgelser. Motivation for at fremme projektet er, at vi har observeret (og været overrasket over) stærkt dykkende forureningsfaner, på en del af vores forureningsundersøgelser.

Ved forureningsundersøgelser udføres der af økonomiske årsager ofte kun få dybe borer, som filtersættes i toppen af sandmagasinerne, da prisen på borearbejde stiger kraftigt med dybden. Dykker forureningsfanen risikerer man at forureningen ikke bliver identificeret, og der konkluderes fejlagtigt, at sandmagasinet ikke er forureningspåvirket. Det kan dermed underestimere det reelle risikobillede, og kan medføre en utilstrækkelig beskyttelse af grundvandsressourcen.



Figur 4-1. Konceptuel forståelse af forureningsspredning i sandmagasiner (lærebog vs. virkeligheden)

Vores fokus er primært relateret til problematikken vedrørende kortlægning af forureningsfaner, der dykker. I flere tilfælde spredes fanerne i vertikal retning i langt højere grad end forventet, se Figur 4-1. Umiddelbart har denne problematik størst interesse for stoffer med langsomme omsætningsrater som de chlorerede stoffer, MTBE, benzen og en række pesticider, der under givne redoxbetingelser kan observeres langt fra de oprindelige kildeområder. Let omsættelige komponenter vil sjældent transporteres så langt fra kilden, at de ovenfor beskrevne effekter er synlige.

4.1 Projektets afgrænsning

Hovedvægten i projektet er at skabe en forståelse og erkendelse af de forskellige forhold og parametre, der har indflydelse på forureningstransporten i dybe sandmagasiner.

Projektet afgrænses til kun at omfatte den mættede zone af sandmagasiner med stor vertikal udbredelse. Som udgangspunkt defineres i denne rapport et mægtigt sandmagasin med stor vertikal udbredelse med baggrund i følgende kriterier:

- Magasinet har en mættet vertikal mægtighed på over 10 m.
- Magasinet har en horisontal udbredelse på over 1 km².

Derudover omfatter projektet kun mobile forureningsstoffer, med særlig fokus på chlorerede opløsningsmidler. Forhold vedrørende forureningsfaner, der skifter retning (drejende faner), vil kun medtages i mindre omfang, idet der primært er fokus på at forstå processerne bag dykkende forureningsfaner.

Det er ikke formålet, at projektet skal udmunde i en vejledning eller en specifik metodik. Derimod skal man med baggrund i projektet kunne tænke problemstillingen ind og tage højde for den i fremtidige undersøgelser.

4.2 Projektets indhold og rapportens opbygning

Projektet består af følgende tre hovedelementer:

- **Trin A:** Opbygning af en ny konceptuel forståelsesmodel vedr. sandmagasiner.
- **Trin B:** Typiske undersøgelsesværkøjer og metoder til kortlægning af undersøgelsesparametre, der har indflydelse på forureningstransporten i sandmagasiner.
- **Trin C:** anbefalinger til vurdering og anvendelse af data vedr. dybe regionale sandmagasiner.

I nedenstående FIGUR 4-2 ses en mere specifik beskrivelse af aktiviteterne for hvert trin, som også svarer til opbygning af rapporten. Aktiviteterne uddybes yderligere i det nedenstående afsnit.

TRIN A	1. Baggrund 2. Formål 3. Detaljeret beskrivelse af problemstillingen a. Definition af et dybt regionalt sandmagasin b. Eksempler på forskellige dykkende forureningsfaner, og faner der ikke dykker c. Dannelsesmiljøer og regionale sandmagasiner i Danmark d. Identifikation og beskrivelse af styrende forhold og parametre 4. Beregningsmodel for simulering af strømning i et sandmagasin a. Rammer for modelopsætning b. Område(r), lag, detaljeringsgrad og styrende parametre c. Kørsel af model med teoretiske scenarier d. Kørsel af model med baggrund i eksempler fra konkrete sager e. Evaluering af resultater af kørsler/scenarier
TRIN B	5. Typiske undersøgelsesværkøjer og metoder til kortlægning af parametre i sandmagasiner a. Boringsstrategi b. Hydraulisk ledningsevne c. Horisontal og vertikal gradient 6. Databehandling
TRIN C	7. Anbefalinger

FIGUR 4-2. Projektets hovedaktiviteter og opbygning af rapporten

5. Detaljeret beskrivelse af problemstillingen

5.1 Definition af et dybt regionalt sandmagasin

Der foreligger ikke en fast definition på, hvad der er et regionalt sandmagasin med stor mægtighed.

I Vandrammedirektivet er et grundvandsmagasin defineret ved: "Et eller flere underjordiske lag af bjergarter eller andre geologiske lag med tilstrækkelig porøsitet og permeabilitet til at muliggøre enten en betydelig grundvandsstrømning eller indvinding af betydelige mængder grundvand" /38/. Hvad der præcist menes med betydelig grundvandsstrømning er ikke helt klart. I denne kontekst er der tale om sandmagasiner, der generelt er karakteriseret ved både porøsitet og permeabilitet, der betinger (eller kan betinge) en betydelig grundvandsstrømning alene ud fra sedimentets egenskaber.

I forståelsen af dykkende faner skal der en vis horisontal udstrækning til, før fænomenet bliver synligt. I vores forståelse bruger vi ordet regionalt, der skal opfattes som magasiner, der har en udbredelse på mange ha niveau eller større (km² størrelse).

I forhold til ordet mægtigt er det i princippet primært relateret til en praktisk opfattelse af hvad man ville vælge ud fra boreddybde, dvs. det er en pragmatisk størrelse. Et sandlag på 2 meters tykkelse vil vi ikke karakterisere som mægtigt, i det det formentlig vil svare til, hvad der kunne filtersættes. En tykkelse på 5 m ville formentlig kunne dækkes med enten to korte filtre eller et langt uden at det vil være økonomisk voldsomt belastende. Når man op på 8-10 m i mægtighed, vil der begynde både at være større omkostninger og udfordringer med at dække mægtigheden med et eller to filtre.

Et pragmatisk bud på en definition af et mægtigt regionalt sandmagasin er dermed at:

- Geologien i magasinet består af finsand til grus.
- Udstrækningen af magasinet er 1 km² eller større.
- Mægtigheden af magasinet er 10 m eller mere.

De beskrevne fænomener kan måske godt forekomme i andre magasintyper end dette, men denne afgrænsning er valgt i forhold til både de beskrevne cases, modellering mm.

5.2 Eksempler på forskellige dykkende forureningsfaner, og faner der ikke dykker væsentligt

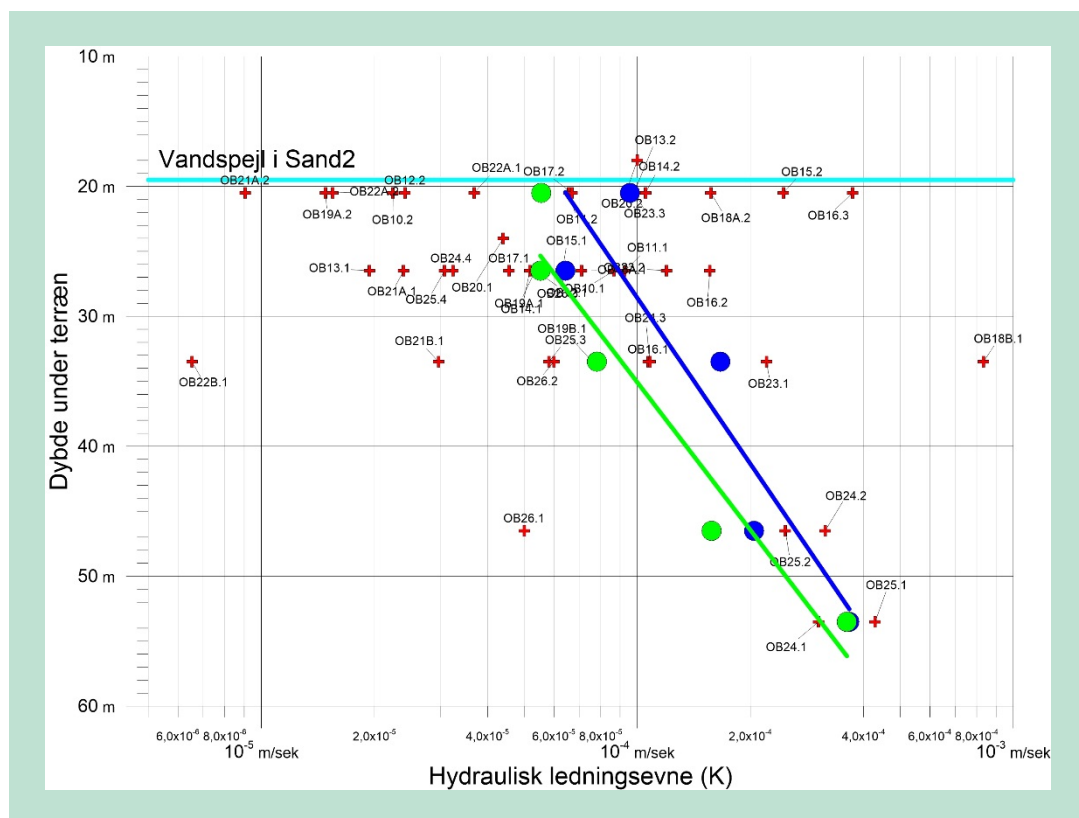
I det følgende er givet en række eksempler på forureningsfaner i mægtige sandmagasiner i Region Hovedstaden, med henblik på at eksemplificerede det observerede fra feltdata.

I kapitel 6 er årsagerne til observationerne søgt forklaret ud fra de modellerede scenarier.

5.2.1 Birkerød Kongevej 158

På Birkerød Kongevej 158 ligger der en igangværende tankstation. Stationen har været i drift i perioden fra engang i 1950'erne. I 1994 blev en større forurening med benzin med indhold af MTBE fundet på ejendommen. Der blev konstateret fri fase i toppen af det dybe sandmagasin i

ca. 20 meters dybde, men langt hovedparten af massen var lokaliseret i den overliggende morænelerspakke, der går ca. 15 m ned fra terræn. Der blev igangsat afværge i form af air-sparging/ventilation i sandlaget samt oppumpning fra magasinet i 1996. Afværge blev drevet frem til 2007 af tankstationens ejere. I 2014 var ejendommen overgået til den offentlige indsats, og der blev i den forbindelse udført en omfattende undersøgelse, der efterfølgende er blevet fulgt op af yderlige boringer og monitoringsrunder samt udarbejdelse af et afværgeprogram. Der er i forbindelse med undersøgelserne udført en ret omfattende karakterisering af de hydrauliske forhold i sandmagasinet ved tankstationen. I Figur 5-1 er vist målinger af den hydrauliske ledningsevne målt ved slugtest som funktion af dybden. Der observeres en relativt stor spredning i værdierne, men en generel tendens til en stigende hydraulisk ledningsevne i dybden.



Figur 5-1. Resultater af slugtest i det dybe sandmagasin som funktion af dybden. Den blå strek viser det aritmetiske gennemsnit og den grønne det geometriske gennemsnit.

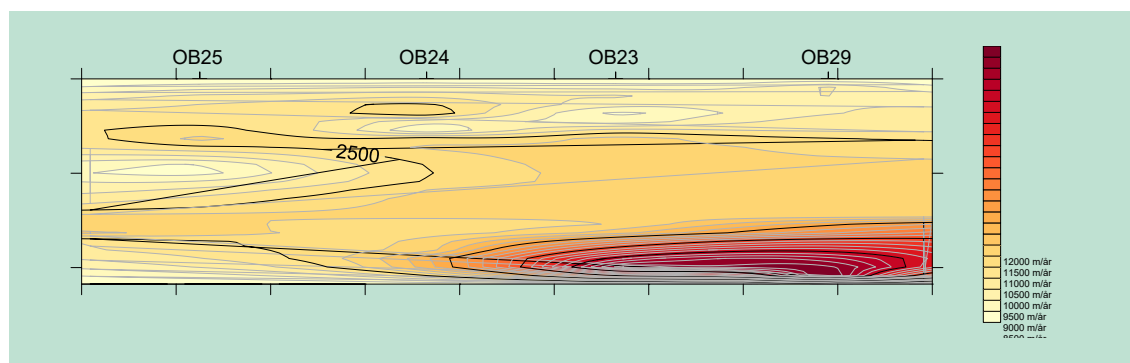
I Figur 5-2 er vist den konceptuelle model for forureningsspredningen, hvor det fremgår, at opløst benzen og MTBE forlader kildeområdet og pga. fanens dykkende karakter kommer ned under mere reducerede forhold (nitrat/manganreducerende), hvor der kun sker langsom eller ingen nedbrydning af stofferne (dokumenteret ved isotopfraktionering). OB22 står ca. 85 m fra kildeområdet og OB26 i ca. 135 m. I 135 m afstand er fanen dykket fra omkring kote 28 til kote 45 svarende til ca. 17 m over strækningen, hvilket umiddelbart er langt mere end forventningen. Strømningen sker i nordlig retning og partikelhastigheden i toppen af magasinet er varierende fra omkring 5-100 m/år (under forudsætning af at den målte gradient over større afstande også gælder lokalt) med en middelværdi på omkring 25 m/år. Ejendommen ligger langt fra et grundvandsskel.

Der indvindes ikke direkte fra sandmagasinet, men i knap 2.000 m afstand mod nord forsvinder det adskillende lerlag mellem kalken og det dybe sandmagasin (fremgår ikke af figuren). Her ligger en større kildeplads, hvor der indvindes store vandmængder. Andre vandforsyninger indvinder nærmere tankstationen i kalken, men her dækker det nederste morænelag rime-

The geological cross-section illustrates the subsurface conditions of the Malmø area. The vertical axis represents depth in meters, ranging from 0 to 60. The horizontal axis shows various boreholes and features, with a 450m scale bar at the top right. The soil profile consists of several layers: Moræneler (Moraine) at the top, followed by Umættet sand (Unsaturated sand), Mættet sand (Saturated sand), and Kalk (Limestone) at the bottom. Groundwater levels are indicated by red wavy lines, with labels for 'Vandpejl i primær sandmagasin' and 'Vandpejl i kalkmagasin'. A blue arrow indicates a groundwater flow direction with $V_p < 30 - 300 \text{ m/år}$. A legend at the bottom left explains the symbols for total cube compressions in soil and foundation.

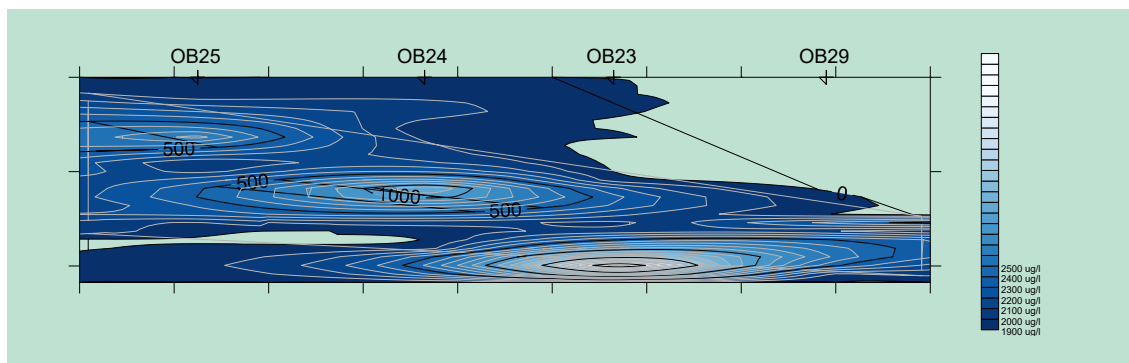
5.2.2 Ravnsbjergvej 1

Ved undersøgelserne er der udført en grundig karakterisering af de hydrauliske forhold ved og nær lokaliteten. Der er både udført slugtest og en korttidspumpetest. På Figur 5-3er vist de fortolkede hydrauliske ledningsevner i et transekt på ca. 140 m med 4 borer med hver tre filtre fordelt i det dybe sandmagasin. Transektet er placeret ca. 100 m nedstrøms kildeområdet.

Miljøstyrelsen / Ny konceptuel forståelse af forureningstransport i regio-nale sandmagasiner - Optimering af undersøgelsesstrategier og metoder **15**

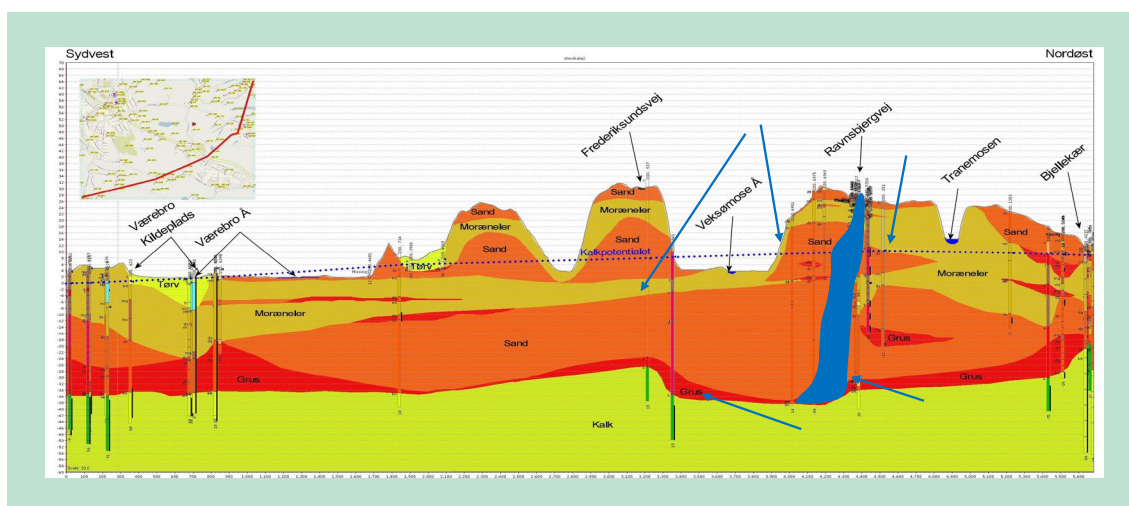
Det fremgår, at der er store forskelle i den målte hydrauliske ledningsevne, ca. en størrelsesorden med de højeste værdier i bunden af magasinet. Hastigheden i toppen af magasinet er i størrelsen 5 m/år baseret på slugtestene (og den overordnede gradient). En efterfølgende pumpetest gav en transmissivitet, der indikerer at ledningsevnen i bunden sandsynligvis er endnu større end antaget på baggrund af slugtestene.

I samme transekt, der ligger ca. 100 m nedstrøms kilden, blev den samme interpolationsmetode brugt ift. TCE-koncentrationer. Resultatet er vist i Figur 5-4. Som det fremgår, observeres her et sammenfald mellem de højeste ledningsevner i bunden af magasinet og de højest målte forureningskoncentrationer. Der er ikke indikationer i datamaterialet på, at dette skulle være forårsaget af fri fase spredning. Vurderingen er derfor, at forureningsspredningen sker med en præferentiel grundvandsstrømning.



Figur 5-4. Målte TCE koncentrationer i transekt 100 m nedstrøms kilden. Y akser er meter under grundvandsspejlet i sandmagasinet og X akser er meter.

Fanen er hermed dykket til ca. 40 m under grundvandsspejlet i en afstand på 100 m fra kildeområdet. Boringer i knap 50 m afstand har ligeledes meget høje koncentrationer dybest i sandlaget lige over den underliggende kalk, svarende til at fanen formentlig er dykket med omkring 45°. Den overordnede geologi i større skala for området fremgår af det geologiske snit, der er lagt i strømningsretningen. Dette er vist på Figur 5-5.



Figur 5-5. Geologisk snit ved Ravnsbjergvej og nedstrøms (mod sydvest, venstre på figuren).

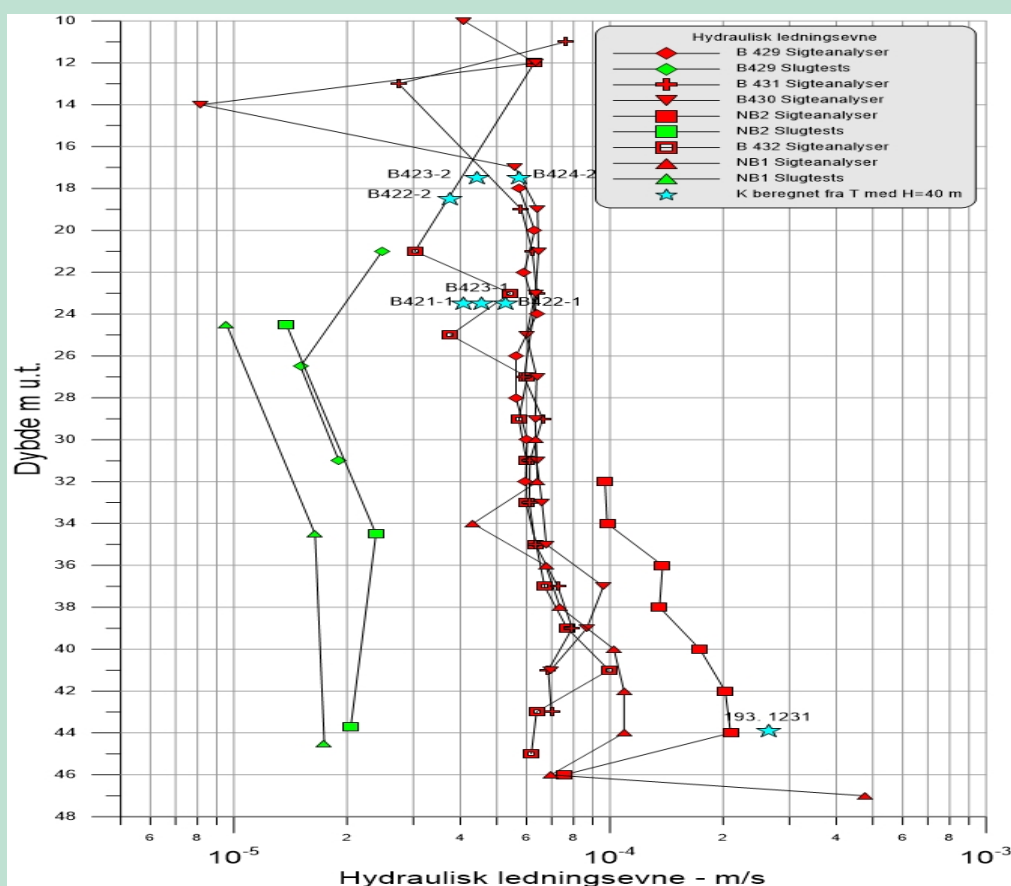
Baseret på det geologiske snit er der flere forhold, der teoretisk set kan rette vandbevægelsen, og hermed stofbevægelsen ned ad. Det er nogle af disse der har dannet baggrund for opstilling af modelscenarierne i de følgende afsnit. Det drejer sig om:

- Ejendommen er tæt på grundvandsskellet, hvor vandbevægelsen teoretisk set forventes at have en stor vertikal komponent.
- Magasinet "ser" ind i en fysisk barriere i form af et lerlag, der potentielt kan tvinge vandet nedad. Barrieren ligger umiddelbart nedstrøms ejendommen (ca. 250 m).
- Indvinding foregår i dybden under sandlaget længere nedstrøms
- Der er et meget groft lag af sand/grus (bundkonglomerat), der kan følges i hele magasinet længde.

5.2.3 Kærhøjgårdsvej 46

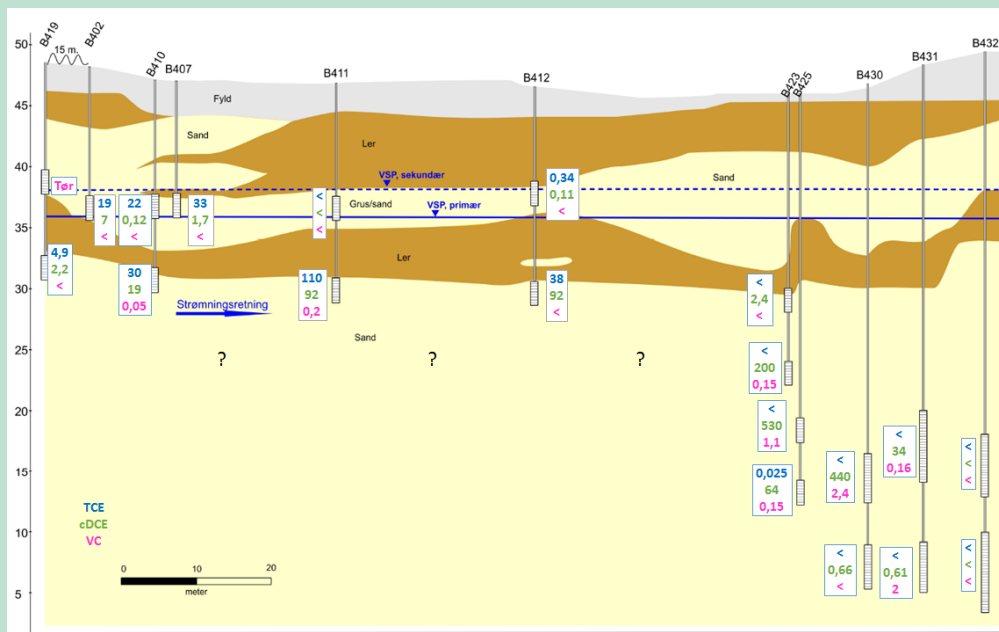
På Kærhøjgårdsvej 46 i Vassingerød har der været en række forskellige aktiviteter, herunder destruktionsanstalt i perioden 1914-1985 og fra 1985 frem til i dag forskellige værkstedsaktiviteter. Der er på ejendommen konstateret en forurening med primært TCE, men også en del af nedbrydningsproduktet cis-DCE og i mindre omfang andre nedbrydningsprodukter.

Der er på lokaliteten udført en omfattende undersøgelse med fokus på udbredelse, nedbrydningsforhold og hydraulikken i det underliggende sandmagasin. Der er ved undersøgelsen anvendt en række forskellige metoder til måling/beregning af den hydrauliske ledningsevne.



Figur 5-6. Sammenligning af værdier for hydraulisk ledningsevne bestemt ved forskellige metoder over dybden. Rød er sigteanalyser, grøn er slugtest og blå er pumpetest.

I Figur 5-6 er samlet resultaterne for de hydrauliske undersøgelser. Disse viser en tendens til, at der er en forhøjet ledningsevne i de dybere lag. Herudover indikerer resultaterne, at ledningsevnerne bestemt ved slugtest er systematisk mindre end værdier estimeret fra kornstørrelsesfordeling og pumpetest, se endvidere afsnit 7.3.2 om dette.



Figur 5-7. Snit i strømningsretningen af målte forureningsindhold i sandmagasinet. TCE koncentrationer er blå, cis DCE grøn og VC er lilla. Kildeområdet er ved boring 407.

I Figur 5-7 er vist koncentrationen af chlorerede opløsningsmidler i strømningsretningen. Som det fremgår af figuren, dykker fanen på denne lokalitet fra omkring kote +35 til kote +15 over en strækning på 50-60 m, svarende til omkring 30°. Gradienten i området er relativt lille, omkring 0,7 ‰, hvilket giver en gennemsnits strømningshastighed på omkring 5 m/år i den øvre del af det nedre sandmagasin og knap en størrelsesorden højere i bunden af magasinet (igen baseret på antagelsen om, at gradienten er konstant i området). Ejendommen ligger omkring 1.000-1.500 m fra vandskellet baseret på det overordnede regionale strømningsbillede. Der indvindes en mindre vandmængde (ca. 45.000 m³/år) i sandlaget ca. 700 m mod SØ (nedstrøms retning) i omkring kote + 5, men ellers foregår de store indvindinger i området langt fra lokaliteten. Der indvindes her i kalken, der er i direkte kontakt med sandmagasinet over store arealer. Der er ingen erkendte større barrierer i den geologiske lagfølge i nær nedstrøms retning.

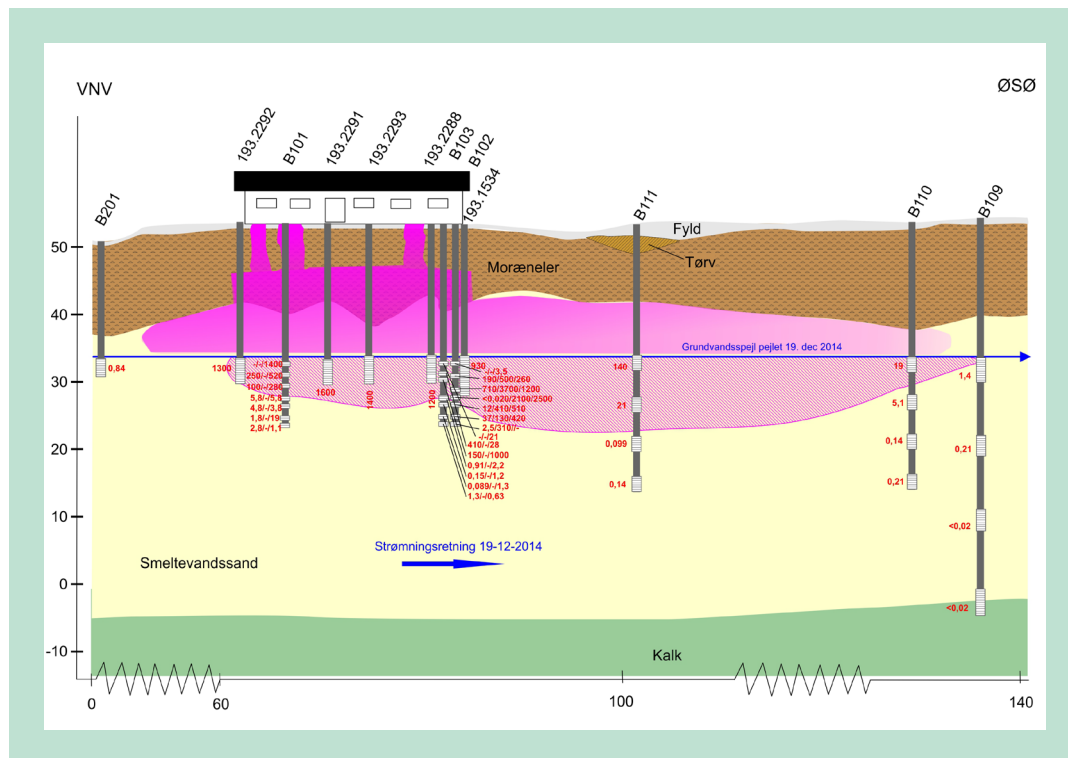
5.2.4 Birkerød Industrikvarter (Hammerbakken 10)

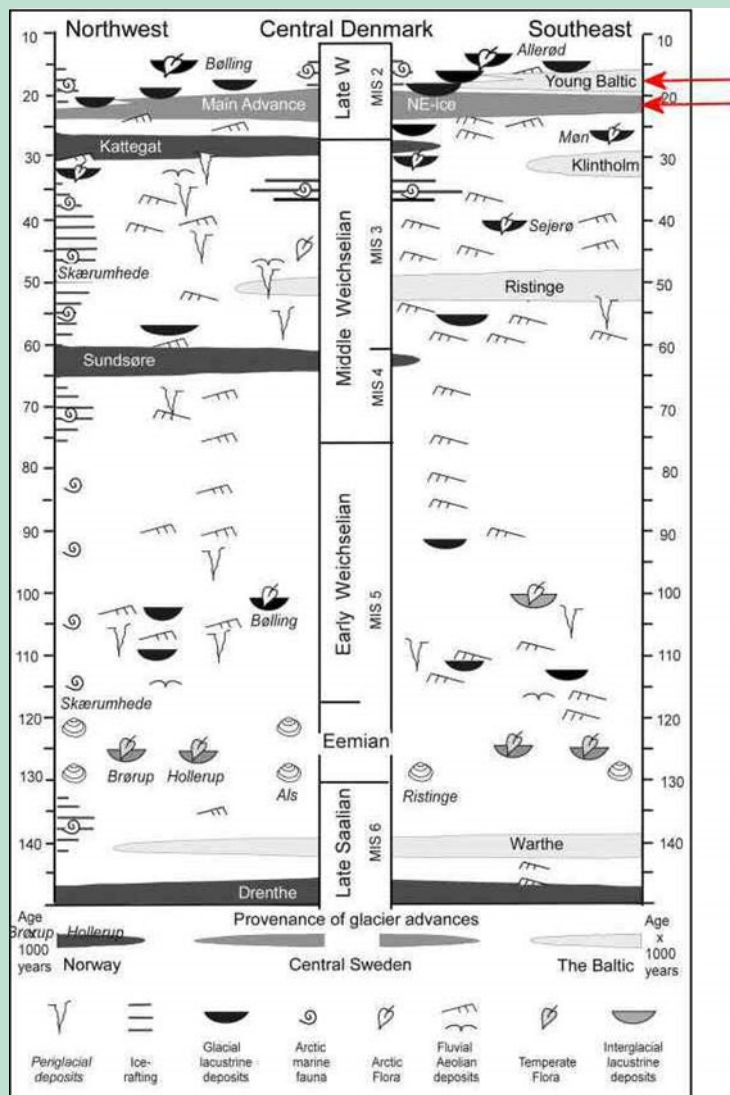
I Birkerød Industrikvarter ligger en række forurenede ejendomme, heriblandt Hammerbakken 10. Det primære undersøgte problem i Industrikvarteret er anvendelse af chlorerede opløsningsmidler i form af både TCE og PCE. På Hammerbakken 10 har der fra 1984 og frem til 2003 været anvendt TCE til affedtning af metalvarer, der skulle lakeres. Der er i forbindelse med en række større undersøgelser konstateret en udbredt forurening med TCE, der primært er knyttet til et det regionale sandlag, der bl.a. ligger under ejendommen. Forureningen er beliggende i både umættet og mættet zone. Der er ligeledes stadig mindre mængder TCE tilbage i det overliggende moræneler. Der er udført omfattende undersøgelser af forureningen og spredningen umiddelbart nedstrøms ejendommen.

Der er målt hydraulisk ledningsevne med slugtest i 4 niveauer i sandet over dybden. Ledningsevnen stiger med dybden fra omkring $3 \cdot 10^{-5}$ m/s umiddelbart under grundvandsspejlet til omkring $4,5 \cdot 10^{-4}$ m/s, eller ca. en størrelsesorden. Sandet beskrives som fint og velsorteret hele vejen ned, dog med sten helt i bunden umiddelbart over kalken. Grundvandstrømningen er langsom, i størrelsesordenen 5 m/år, og lokaliteten ligger langt fra nærmeste grundvandsskel

opstrøms (ca. 3.000 m). Nærmeste indvindinger foregår i kalken, og ligger ca. 2.000 m nedstrøms ejendommen.

I Figur 5-8 er vist et snit i strømningsretningen for forureningen med TCE-indhold angivet.

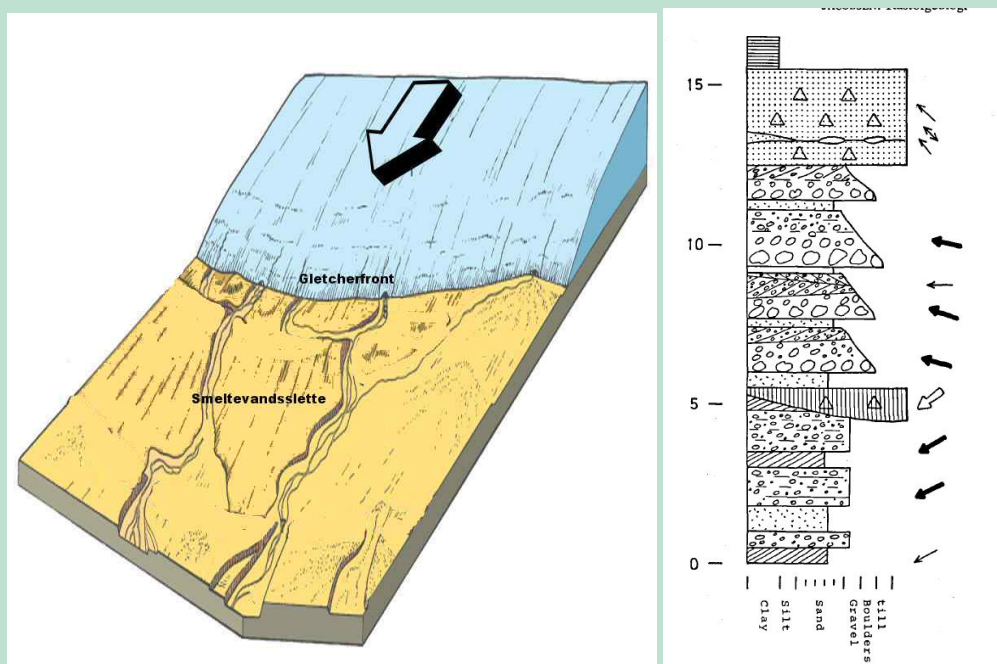




FIGUR 5-9. Isfremstød i Weichsel efter /3/. Nordøstfremstødet og det ungbaltske isfremstød er markeret med pile og isstrømme under Weichsel-nedisningen (til højre), efter /1/

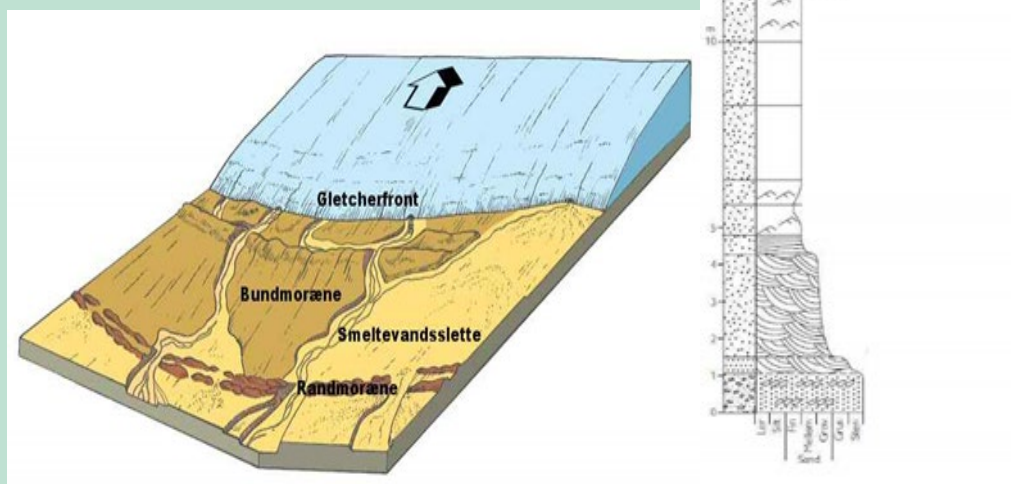
De enkelte isfremstød har fluktueret, dvs. der er ikke tale om én fremrykning med efterfølgende tilbagesmeltning. Særligt under de ungbaltske isfremstød er der dokumenteret flere fremstød og tilbagesmeltninger, som hver især har afsat smeltevandsaflejringer.

De afsatte sandaflejringeres beskaffenhed blev i høj grad styret af, hvornår de blev afsat ifm. de enkelte isfremstød. Under en fremrykkende is ses typisk, at de groveste aflejringer er afsat i toppen af sandformationerne (coarsening up sekvens), fordi smeltevandets strømningsenergi er blevet større, efterhånden som isfronten er rykket tættere på, se FIGUR 5-10.



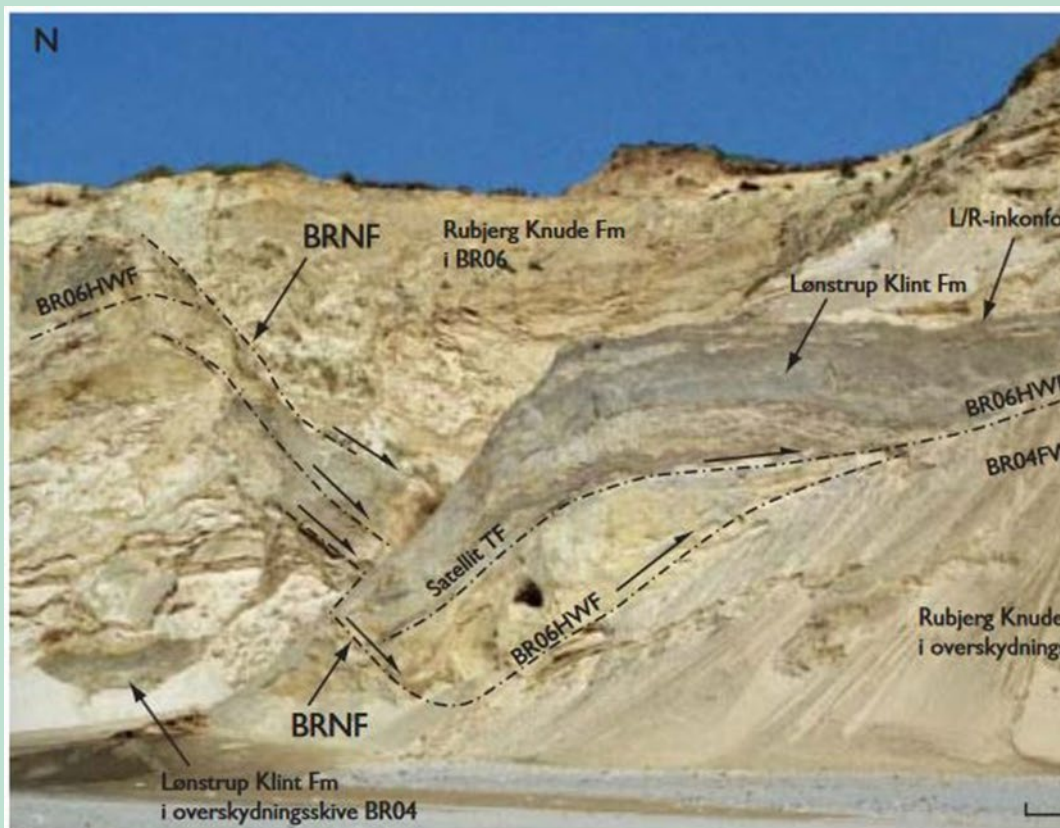
FIGUR 5-10. Fremrykkende is (venstre) og sedimentologisk profil fra grusgrav vest for Reerslev med coarsening upward sekvens efter /4/ (højre)

Omvendt ses der ved en tilbagesmeltende isfront, at aflejringerne typisk bliver finere opad (fining upward sekvens) fordi smeltevandets strømningsenergi aftager efterhånden som afstanden til isfronten øges, se FIGUR 5-11. Det er specielt i denne situation, der sandsynligvis kan være tale om dykkende forureningsfaner, fordi den hydrauliske ledningsevne tiltager med dybden. Dette aflejringsmiljø vil oftest være bedre bevaret end aflejringerne ved den fremrykkende is, da den fremrykkende is ofte vil bortrodere de allerede aflejrede lag foran isen. Væsentlige sandmagasiner nord for København tolkes til at være afsat foran en tilbagesmeltende is på grund af markante fining upward sekvenser.



FIGUR 5-11. Tilbagesmeltene is og sedimentologisk profil af Birket Formationen, Birket grusgrav, NV-Lolland, efter /5/

Uanset aflejringsmiljøet kan efterfølgende isfremstød væsentligt forstyrre det sedimentologiske profil og f.eks. give anledning til flagedannelser. FIGUR 5-12 viser stærkt forstyrrede lag ved Rubjerg knude som følge af isfremstød i sen Weichsel.



FIGUR 5-12. Flagedannelser og stærkt forstyrrede lag ved Rubjerg Knude som følge af glacial tektonik i sen Weichsel, efter /6/

I sagens natur er det i Danmark kun de umættede dele af de afsatte smeltevandsaflejringer, der er velbeskrevne. Dybere vandmættede magasiner af glaciofluviale sandmagasiner er sjældent beskrevet detaljeret, hvorfor det kan være vanskeligt at afgøre, hvorvidt der er tale om aflejringer afsat under en fremrykkende eller tilbagesmeltende is. Desværre er det derfor oftest nødvendigt at benytte indirekte metoder til at afgøre, om der er tale om fining opward eller coarsening opward sekvenser og derigennem afgøre, om der kan være en risiko for dykkende forureningsfaner på grund af dybe højpermeable zoner. For en vurdering af det sedimentologiske profil på en given lokalitet kan viden om kvartærstratigrafien indgå. Det kan være at formationens aflejningsbetingelser er kendt fra undersøgelser af begrænsende moræneaflejringer (kornanalyser, stenretninger mv.); dele af formationen er måske blottet i nærliggende grusgrave eller kystklinter. Detaljerede borningsbeskrivelser, kornstørrelsesanalyser fra boreprøver eller undersøgelser af hydrauliske ledningsevner kan yderligere understøtte tolkningen af det sedimentologiske profil.

5.4 Identifikation og beskrivelse af styrende forhold og parametre

Ved analyse af de eksempler, der er kort beskrevet i de tidligere afsnit, samt i en række andre eksempler, er der identificeret en række parametre, der forventes at kunne have en indflydelse på, om en forureningsfane vil dykke. Det drejer sig om følgende parametre:

- Tilstedeværelse af højpermeable zoner i dybere lag. Disse forventes at medføre en større vertikal transport.

- Anisotropi i de hydrauliske ledningsevner. Umiddelbart forventes en større vertikal transport ved mindre forskel mellem den vertikale og horisontale ledningsevne.
- Placering af kilden ift. vandskel. Helt basalt vil den vertikale strømningskomponent være størst ved vandskellet og mindst ved udløb i fri recipient (havet, en stor sø, et vandløb osv.)
- Oppumpning af større vandmængder i dybden ifm. indvinding. Forventningen er at en stor oppumpning vil give en større transport nedadtil.
- Infiltrationens størrelse, særligt ved selve kilden. Stor infiltration lokalt forventes at give en større vertikal komponent, og dermed en større vertikal transport.
- Vertikale barrierer i form af lavpermeable zoner, der bryder lagfølgen strømningen foregår i. Disse forventes at have betydning i forhold til den vertikale transport.

Denne liste har dannet baggrund for den modelanalyse af de forskellige forhold der er præ-senteret i det følgende hovedafsnit.

6. Beregningsmodel for simulering af strømning i et sandmagasin

Som beskrevet i de foregående afsnit er der identificeret en række forhold, der forventes at kunne bidrage til, at faner dykker i større sandmagasiner. En måde at få sådanne forhold belyst er at opstille en matematisk model, der tager højde for processerne og så sammenligne forskellige scenarier, hvor man varierer på de parametre, man vil undersøge effekten af, enten enkeltvis eller sammen, hvis man forventer, der er en grad af overlap mellem parametrene effekter. Metoden er ikke skudsikker på de absolutte værdier, men der er god til at få et indblik i mekanismer og de enkelte parametres relative betydning.

Der er på den baggrund opstillet to overordnede modeller i GMS/MODFLOW, der konceptuelt beskriver grundvandsdannelse og strømning i et magasin, som svarer til et sandmagasin, der strækker sig fra omkring midten af Nordsjælland og ud mod Øresund. Trykniveauet ved vand-skel er valgt, så det matcher det, der måles naturligt og grundvandsdannelsen lidt til den høje side af, hvad der fx er anvendt i DK-modellen (der overvejende er kalibreret på kalkmagasinet trykniveau), men mindre end det der anvendes i JAGG til beregning af påvirkning af det førstkomende magasin.

I det følgende er mere detaljeret gennemgået de enkelte scenarier, der er opstillet med modellen, og hvordan disse kan fortolkes set i lyset af de observationer, der er gjort i de eksempler, der er præsenteret i tidligere afsnit.

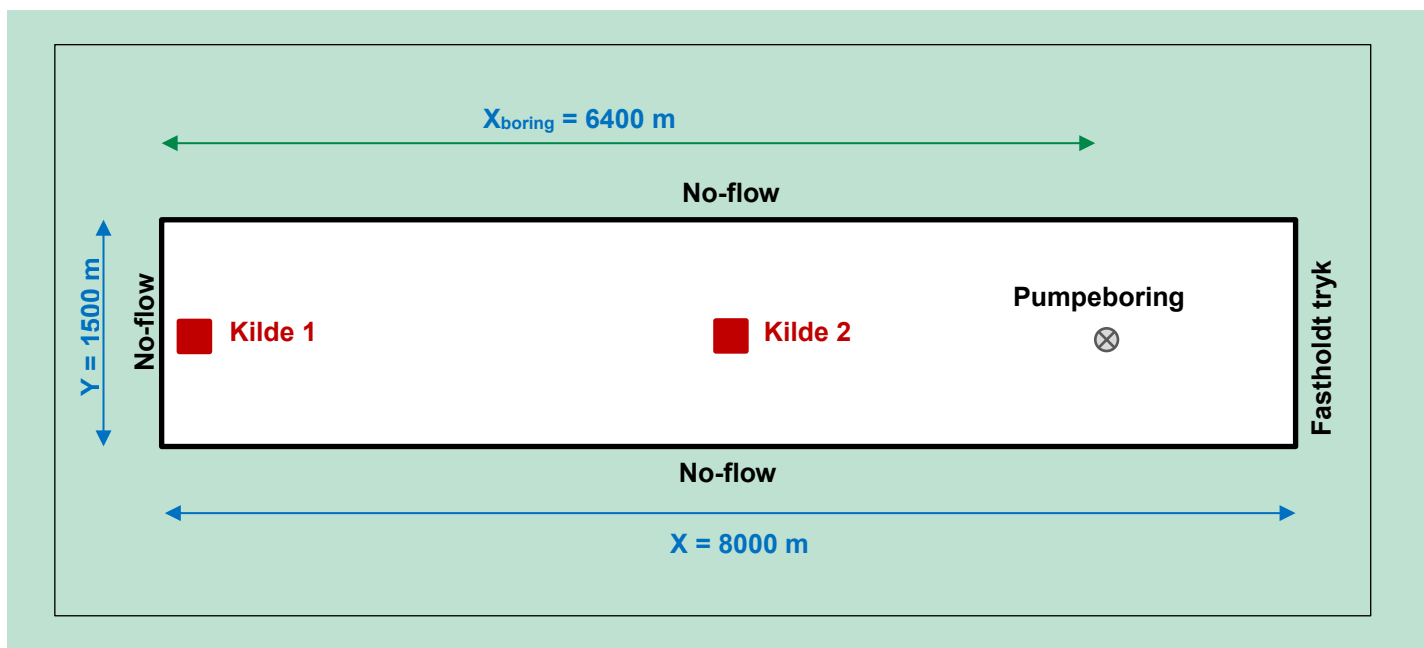
6.1 Rammer for modelopsætning

Som nævnt ovenfor er der opsat to syntetiske modeller, der kunne svare til et magasin i Nordsjælland. Modellerne er opsat i MODFLOW-NWT ved brug af applikationen GMS (version 10.2.5). Formålet er jf. tidligere beskrevet at teste forskellige parametres indflydelse på strømmingen, udtrykt ved fordeling af partikler fra syntetiske kilder i modellen. MODPATH er blevet anvendt til partikelbanesimuleringer til de indledende vurderinger af forureningsspredningen fra forureningskilden samt til afgrænsning af indvindingszonen til den indvindingsboring, der indgår i modelleringen.

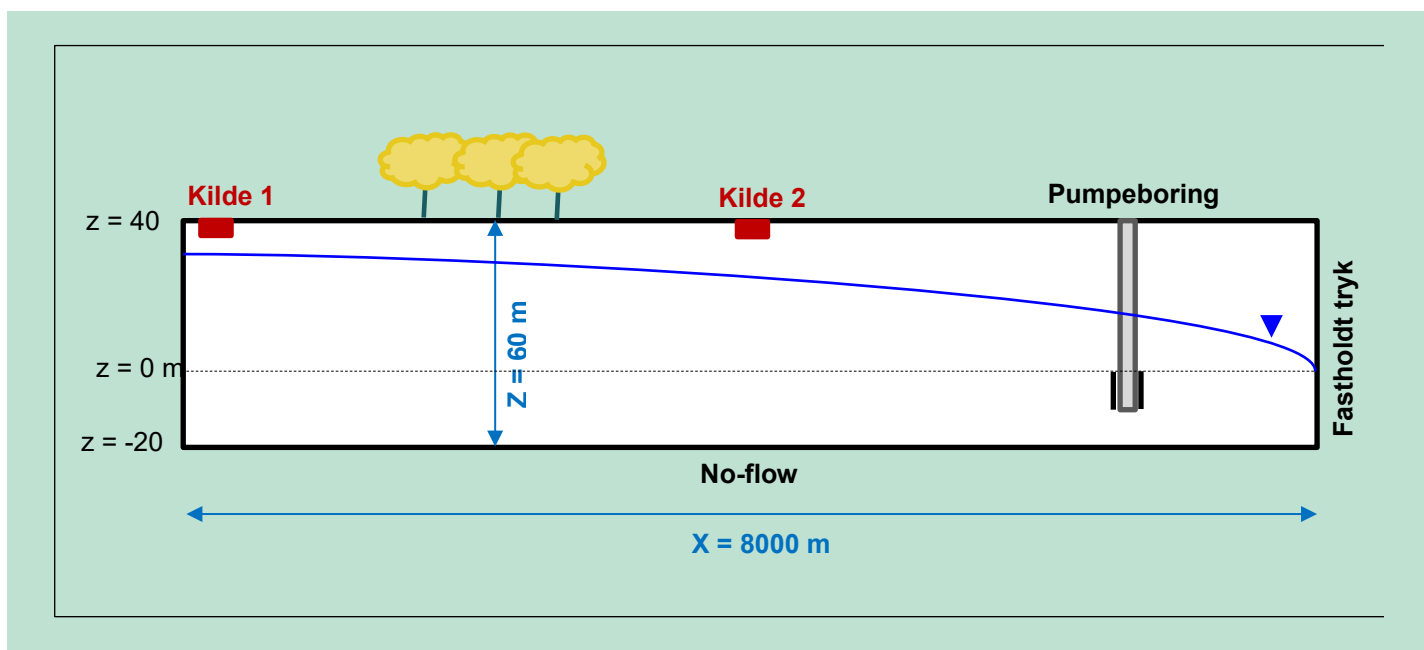
Modellen er ikke en egentlig stoftransportmodel og tager derfor ikke hensyn til dispersion/diffusion, sorption eller nedbrydning.

6.2 Modelopsætning og kalibrering

Den opstillede model for basisscenariet som det hele er sammenlignet med består af en kasse med X (længde) = 8000 m, Y (bredde) = 1500 m og en samlet Z (dybde) = 60 m. Pga. ønsket om testning af placering af kilder to forskellige steder i modelområdet er der opstillet to forskellige modeller, idet diskretiseringen omkring kildeområdet er forfinet i de to opsætninger. Modelopsætningen regner på et frit magasin, eftersom det er dette, der observeres over ret store områder i Nordsjælland. I FIGUR 6-1 er modelområdet set oppefra og i FIGUR 6-2 er modelområdet set fra siden.



FIGUR 6-1. Modeldomænet set ovenfra.

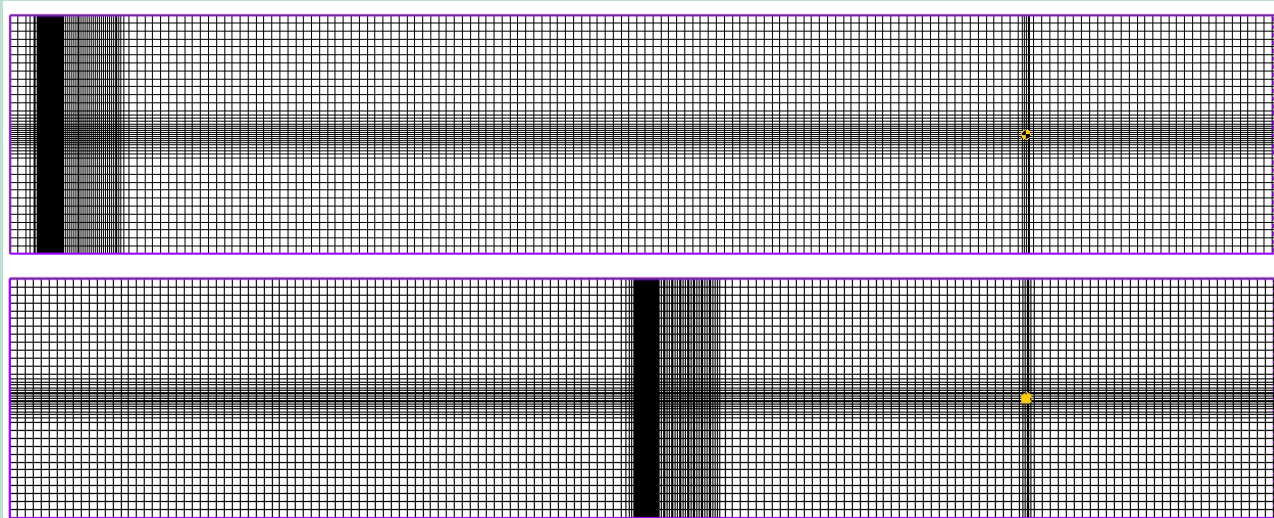


FIGUR 6-2. Modeldomænet set fra siden

Vertikalt er modellerne opdelt i 60 lag af 1 meters tykkelse. Det var oprindeligt ønsket at benytte en overordnet horisontal diskretisering på 20 m x 20 m, som var forfinet i x-retningen således, at diskretiseringen var 1 m ved kildeområdet og 5 m i et område op til 500 m nedstrøms kilden. På grund af størrelsen af domænet gav dette imidlertid store udfordringer i forhold til kørslen af modellen. Det var således svært at få modellerne til at køre stabilt med den ønskede diskretisering. Stabiliteten af modellerne forværres sandsynligvis af det faktum, at et meget stort antal af cellerne er 'tørre' (og dermed inaktive); fx var samtlige celler i de øverste 9 lag således fuldstændig tørre i basisscenariet (se senere).

Det er derfor valgt at køre modelleringen med en diskretisering i x-aksen på 2,5 m ved kilden, 12,5 m nedstrøms kilden og 50 m i resten af domænet. Langs y-aksen er diskretiseringen 12,5

m ved kilden og øges gradvist til 50 m væk fra kilden. Der er endvidere benyttet en finere diskretisering på 12,5 m x 12,5 m omkring indvindingsboringen. Den horisontale diskretisering af de to modeller fremgår af FIGUR 6-3.



FIGUR 6-3. Horizontal diskretisering ved forureningskilden placeret hhv. opstrøms (figur øverst) og midt (figur nederst) i domænet. Den vertikale diskretisering er 1 m (dvs. 60 lag).

Der er i modellen anvendt fastholdt tryk på 0 m ved den østlige rand og no-flow rande på de tre øvrige vertikale rande, samt i bunden af modellen. Nettoinfiltrationen er i basisscenariet sat til 0,25 m³/m² år. Pumperaten i indvindingsboringen er varieret, men er i basisscenariet sat til 0 m³/år.

Modellen er ægte 3D, men mange af tolkningerne tager udgangspunkt i 2D, idet alle lag i modellen er gennemgående i hele X og Y akser.

I basisscenariet er den hydrauliske ledningsevne K antaget konstant over hele domænet. Der er benyttet en horisontal og vertikal anisotropifaktor (K_h/K_v) på 10 for alle lagene i basisscenariet. Det specifikke magasintal og magasinydelsen er ikke blevet specificeret i grundvandsmodellen (er sat til 0), da modellen er stationær. Porøsiteten er som udgangspunkt sat til 0,25 for alle lag.

Den effektive horisontale hydrauliske ledningsevne K "kalibreres" således, at trykniveauet ved den vestlige rand ($x = 0$ m) bliver omkring kote +30 m, svarende til det trykniveau der observeres maksimalt i toppen af det store Nordsjællandske sandmagasin.

Denne kalibrering kan foretages analytisk, idet trykniveauet i et frit magasin med no-flow rand opstrøms og fastholdt tryk h_1 nedstrøms er givet ved:

$$h(x) = \sqrt{\frac{N}{K}(X^2 - x^2) + h_1^2} \quad (1)$$

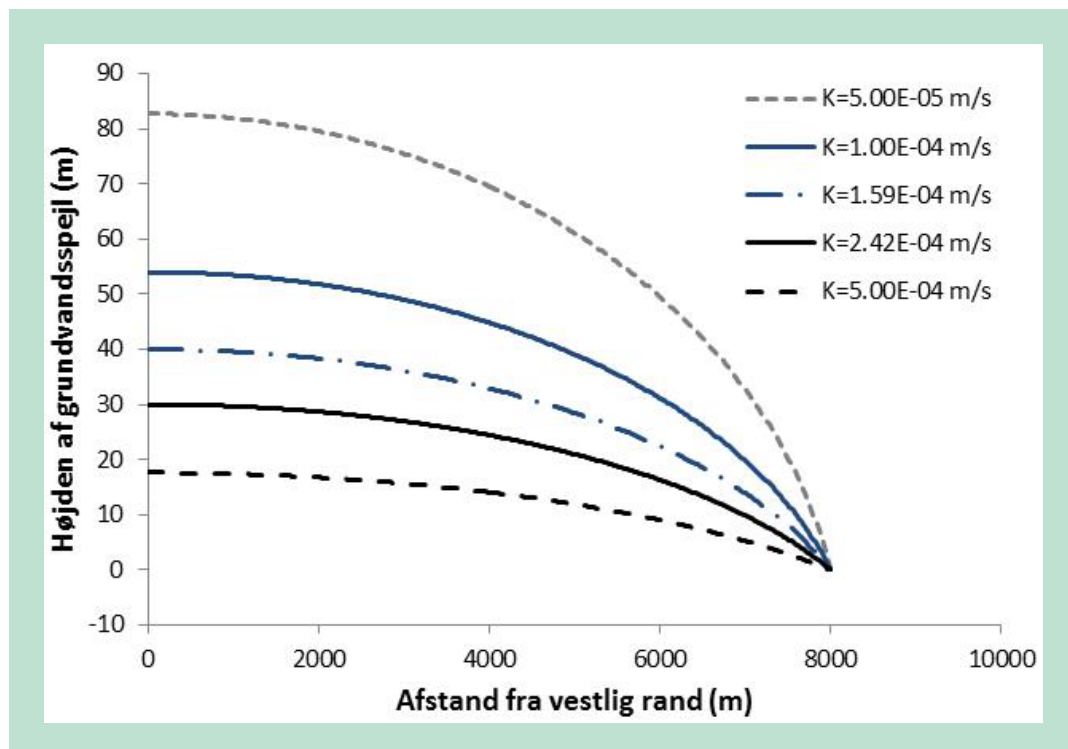
hvor N er nettonedbøren (m/dag), K er den horisontale hydrauliske ledningsevne (m/dag), X er længden af domænet i strømningsretningen (m) og h_1 er trykniveauet ved den nedstrøms rand (m). For at opnå et givent trykniveau ved den vestlige rand $h(x=0) = h_2$, skal K derfor være:

$$K = \frac{N}{(h_2^2 - h_1^2)} X^2 \quad (2)$$

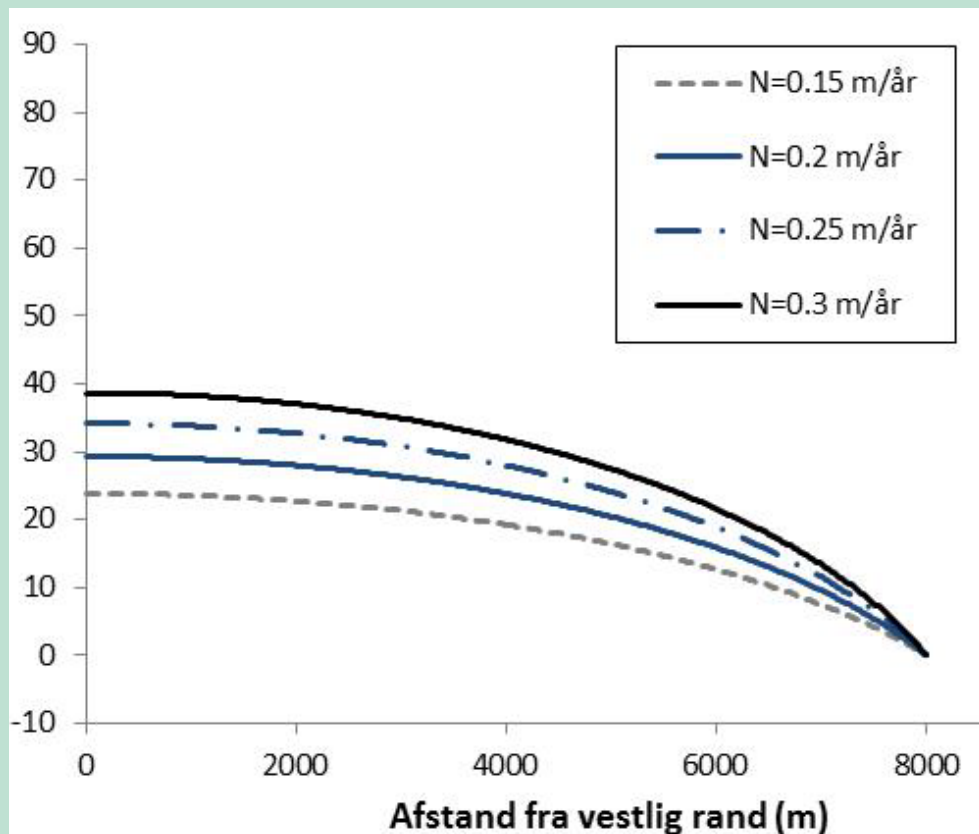
Hvis $h_1 = 20$ m (grundvandsspejlet er i kote 0 m, som er 20 m over bunden af grundvandsmagasinet, jvf. FIGUR 6-2, $X = 8000$ m, $N = 0,25$ m/år, og hvis grundvandsspejlet ved den vestlige rand ønskes i kote +30 m ($h_2 = 50$ m), skal K således være 20,87 m/dag ($2,4 \times 10^{-4}$ m/s), svarende til K -værdien for mellem til groft sand.

Hvis nettonedbøren var 0,1 m/år, ville K i stedet skulle være $9,7 \times 10^{-5}$ m/s for at opnå et potentiale på +30 m ved den vestlige rand.

I FIGUR 6-4 og FIGUR 6-5 er grundvandsspejlet simuleret analytisk langs x-aksen med ligning 1 for forskellige værdier af K og N . Det ses, at grundvandsspejlet simuleres højere ved større værdier af N og lavere værdier af K . De horisontale gradienter bliver ligeledes større ved øget nettonedbør.



FIGUR 6-4. Grundvandsspejlet simuleret analytisk med ligning 1 for et homogent frit magasin ved forskellige hydrauliske ledningsevne værdier og fastholdt nettoinfiltration på 0,25 m/ år



FIGUR 6-5. Grundvandsspejlet simuleret analytisk med ligning 1 for et homogent frit magasin ved forskellig nettoinfiltration og fastholdt ledningsevne på $2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

6.3 Kørsel af model med teoretiske scenarier

Der er afviklet en lang række scenarier, der er nærmere beskrevet i de følgende afsnit. Scenarierne belyser forskellige parametre, som forventedes at have en væsentlig indflydelse på partikelbanerne. Generelt sammenlignes forskellige scenarier med basisscenariet, der er beskrevet i afsnit 6.3.1. For alle scenarierne er der samtidig udtrykt opholdstider for partiklerne fra de to kilder til de strømmer ud i den østlige rand (eller i enkelte tilfælde bliver indfanget i oppumpningen).

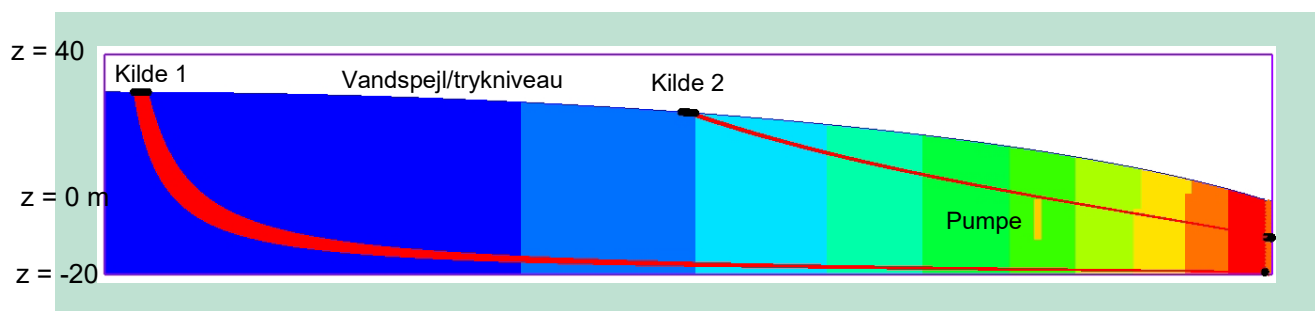
6.3.1 Basisscenarie

I basisscenariet er der som tidligere beskrevet anvendt konfigurationen af parametre som vist i TABEL 1. Scenariet simulerer basisafstrømningen uden oppumpning, og al nedbøren i modelområdet ($3.000.000 \text{ m}^3$) strømmer dermed ud igennem den nedstrøms rand i scenariet.

TABEL 1. Parameterkonfiguration i basisscenariet

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ år}$)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K_h	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Nej
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	-
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, $K_h \text{ lag}/K_h \text{ generel}$)	Faktor	-
Vertikal ledningsevne (faktor K_h/K_v)	Faktor	10
Oppumpningens størrelse ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q	0

På FIGUR 6-6 er vist resultatet af scenariekørslen. Som det fremgår af figuren, er der en klar forskel på spredningen af partiklerne fra de to kilder, hvor der ved den opstrøms kilde ses en klart mere lodret transport (dykkende fane), men også ved kilden placeret midt i domænet transporteres partiklerne ned i magasinet i betydelig grad. Bemærk, at figurerne for visualiseringen skyld er tegnet med en overhøjde på ca. en faktor 133.



FIGUR 6-6. Simuleret grundvandspotentiale og partikelbaner fra forureningskilden placeret hhv. opstrøms og midt i domænet for basisscenariet (pumpeboringen er inaktiv), set i et længdesnit. Pumpeboringens filter er vist som en gul firkant. Bemærk at topkoten og bundkoten i figuren er i hhv. kote 40 m og -20m. Farverne afspejler trykniveauet med blåt som det højeste og rødt som laveste.

Basisscenariet er også blevet kørt med en nettonedbør på 0,1 m/år og en effektiv hydraulisk ledningsevne på $9,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Som forventet resulterer dette i præcis det samme potentialebillede og partikelbaner, som vist i FIGUR 6-6. Den eneste forskel er, at de simulerede transporttider fra de to kilder er 2,5 gange længere end i basisscenariet (idet K er en faktor 2,5 lavere). I basisscenariet simuleres således en transporttid fra den opstrøms- og midt-placerede kilde til den østlige rand på hhv. 160 år og 25 år, mens de tilsvarende transporttider ved den reducerede hydrauliske ledningsevne og nettonedbør er hhv. 400 år og 62,5 år.

Placeringen af kilden i strømningsregimet spiller dermed en meget stor rolle for partikelbanerne.

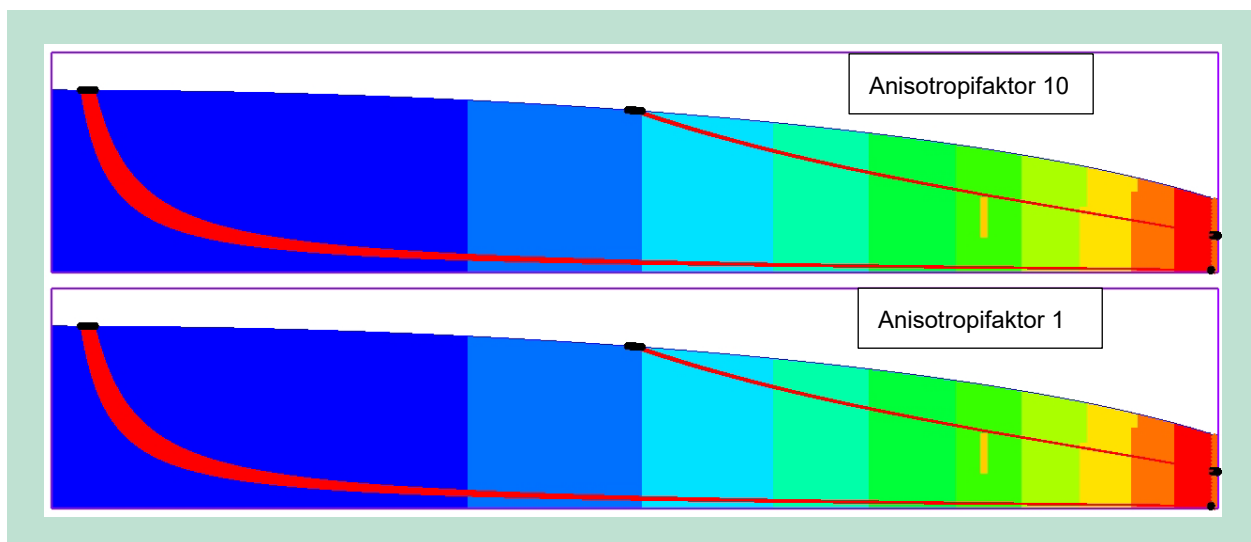
6.3.2 Effekt af anisotropi

I basisscenariet er anvendt en faktor 10 i forholdet mellem den horisontale og vertikale ledningsevne. Dette er den traditionelle tilgang i meget modellering, hvis ikke forholdet er målt. Forholdet skal afspejle en præferentiel aflejring geologisk set og afspejle forskellige kornstørrelser i det vertikale plan i et begrænset omfang. Hvis materialet er meget homogent kan man på en lille skala forvente, at anisotropifaktoren er mindre. I scenariet er der testet et forhold på 1 jf. Tabel 2 som normalt vil være det mindste der kan forekomme.

Tabel 2 Parameterkonfiguration ved vurdering af anisotropi

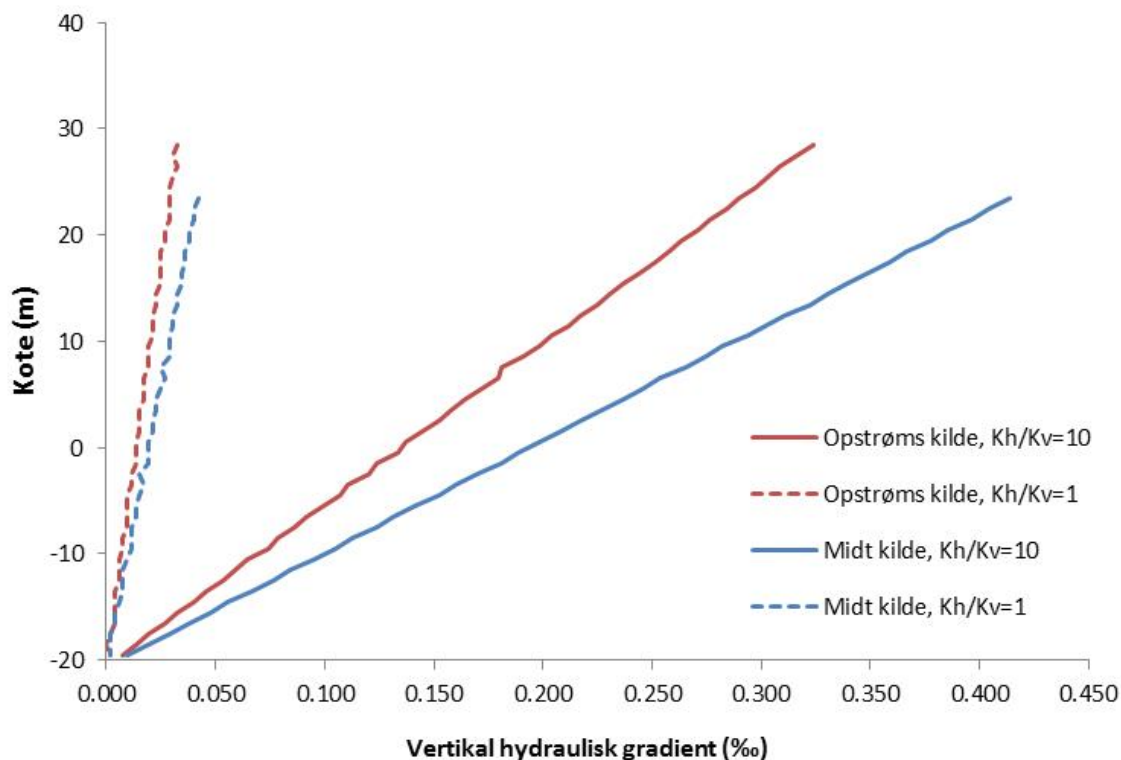
Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ år}$)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K_h	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Nej
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	-
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, $K_h \text{ lag}/K_h \text{ generel}$)	Faktor	-
Vertikal ledningsevne (faktor K_h/K_v)	Faktor	1
Oppumpnings størrelse ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q	0

I FIGUR 6-7 er vist hhv. basisscenariet (øverst) og scenariet hvor anisotropifaktoren er reduceret til 1. Som det fremgår af figuren, medfører ændringen af anisotropifaktoren ingen påvirkning på partikelbanerne, hvad der umiddelbart er modstridende i forhold til forventningen. Det viser sig, når man analyserer trykniveauerne omkring kilderne, at den øgede vertikale hydrauliske ledningsevne, modsvares af en tilsvarende mindre vertikal gradient, så afstrømningsforholdene (hastigheden i vertikal og horisontal retning) i de to scenarier bliver identiske. Opholdstiderne bliver dermed også som i basisscenariet, dvs. 160 år for den opstrøms kilde og 25 år for den nedstrøms kilde.



FIGUR 6-7. Partikelbaner i basisscenariet med anisotropifaktor på 10 (øverst) og scenarie med reduceret anisotropifaktor på 1 (nederst).

I FIGUR 6-8 er vist de beregnede gradienter ved de to kilder med de to forskellige anisotropifaktorer.



FIGUR 6-8. Simulerede vertikale hydrauliske gradienter under de to kilder (placeret hhv. ved det opstrøms vandskel og i midten af domænet) ved en anisotropifaktor (K_h/K_v) på hhv. 10 og 1.

Det bemærkes, at ved den høje værdi af anisotropifaktoren er den maksimale værdi af den vertikale hydrauliske gradient 0,3-0,4 ‰. Dette svarer til en trykforskel på 3-4 mm mellem to filtre sat med 10 m indbyrdes vertikal afstand. Dette er langt under, hvad man kan forvente at kunne pejle med traditionelt pejleudstyr.

Anisotropien (vertikal ift. horisontalt) spiller dermed en lille/ingen rolle ift. partikelbanerne.

6.3.3 Effekten af oppumpning

Som det fremgår af figurerne med modeldomænet er oppumpningen placeret i $X=6400$ m og $Y=750$ m (midt på strømmingen) og filteret for indtaget sat i kote 0 til -10. Der er som tidligere beskrevet en samlet nettonedbør i modellen på 3 mill. $m^3/år$.

I modellen er der afprøvet 3 forskellige pumperater, som svarer til hhv. en lille lokal indvinding, en mellemstor indvinding, og en relativt stor indvinding. I modellen er anvendt en oppumpning på hhv. 10.000, 100.000 og 1.000.000 $m^3/år$, eller i det maksimale tilfælde en total udnyttelsesgrad på ca. 33% af den dannede vandmængde i modellen.

I Tabel 3 er vist de anvendte parametre i scenarierne, der vurderer oppumpningens effekt på partikelbanerne.

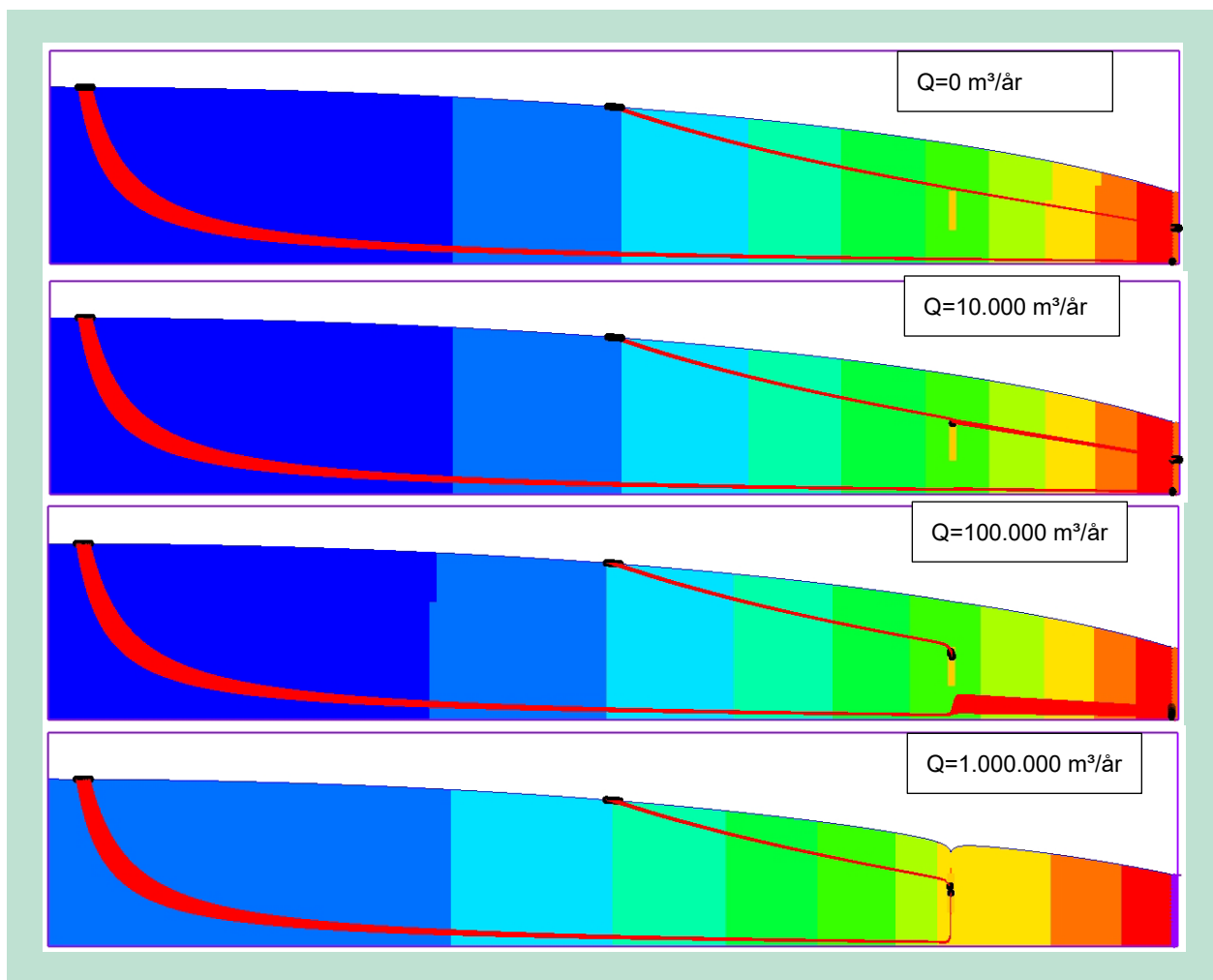
Tabel 3 Parameterkonfiguration ved vurdering af oppumpning

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør (m^3/m^2 år)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K_h	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Nej
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	-
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, K_h lag/ K_h generel)	Faktor	-
Vertikal ledningsevne (faktor K_h/K_v)	Faktor	10
Oppumpningens størrelse ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q	10.000
		100.000
		1.000.000

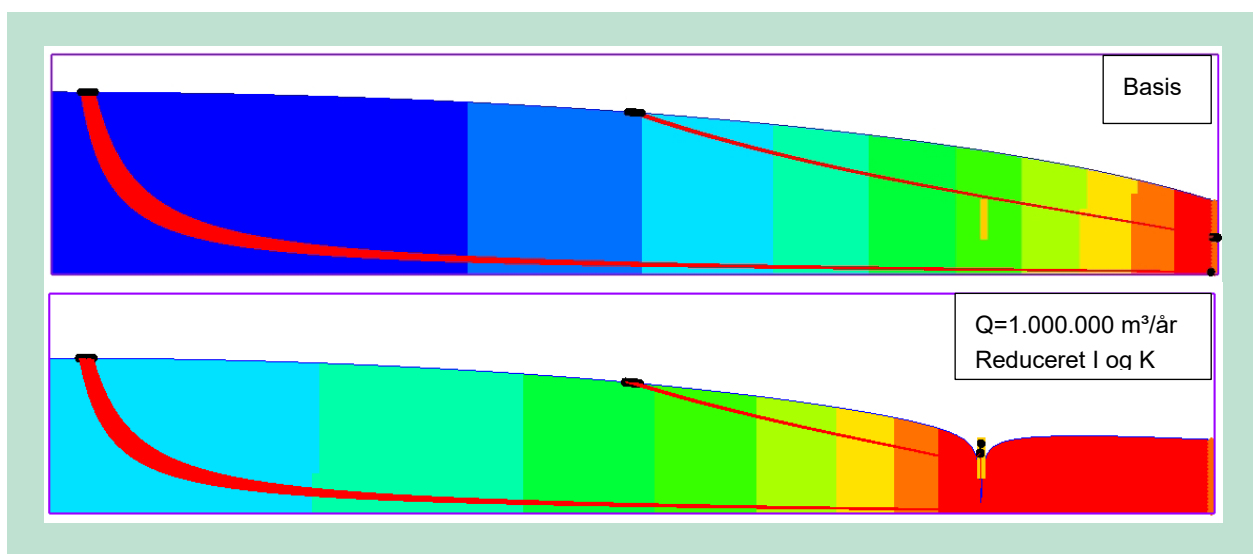
I FIGUR 6-9 er vist partikelbanerne i stigende orden af pumperaten, sammen med basisscenariet øverst. Som det fremgår af figuren, er der kun en meget lille effekt på partikelbanerne omkring kilderne i de tre pumpescenarier sammenlignet med basisscenariet.

I forhold til partikelstrømningen ved filteret ses der en effekt ved $100.000 \text{ m}^3/\text{år}$, hvor alle partiklerne fra den nedstrøms kilde ender i filteret og partiklerne fra den opstrøms kilde "løftes" op i magasinet, dog uden at ende i filteret. Ved en indvinding på $1.000.000 \text{ m}^3/\text{år}$ ender alle partiklerne fra begge kilder i filteret. I forhold til opholdstiden er det kun ved den maksimale oppumpning på $1.000.000 \text{ m}^3/\text{år}$, at gradienten påvirkes så meget, at opholdstiden ændres signifikant. Her er opholdstiden fra øvre kilde 144 år og nedre 16 år, hvor det i basisscenariet (og ved lavere pumpeydeler) er hhv. 160 og 25 år.

Scenariet er gentaget med en reduceret nettonedbør på $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ år og tilsvarende reduceret værdi af K_h . Som det fremgår af FIGUR 6-10 er der ikke en væsentlig forskel fra hverken basisscenariet eller pumpescenariet ved $1.000.000 \text{ m}^3/\text{år}$ og den højere ledningsevne, udover at det generelle trykniveau påvirkes mere. Ved en nettoinfiltration på $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ svarer $1.000.000 \text{ m}^3/\text{år}$ til 83 % af den samlede infiltration i hele modelområdet.



FIGUR 6-9. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og med tre pumperater (10.000, 100.000 og 1.000.000 m³/år) i rækkefølge under med filteret i kote 0 til -10. (infiltrationen (0,25 m/år) og den horisontale ledningsevne ($2,4 \cdot 10^{-4}$ m/s).



FIGUR 6-10. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og pumperaten 1.000.000 m³/år (nederst). I testscenariet er oppumpningen kombineret med en reduceret værdi af infiltrationen (0,1 m/år) og den horisontale ledningsevne ($9,7 \cdot 10^{-5}$ m/s).

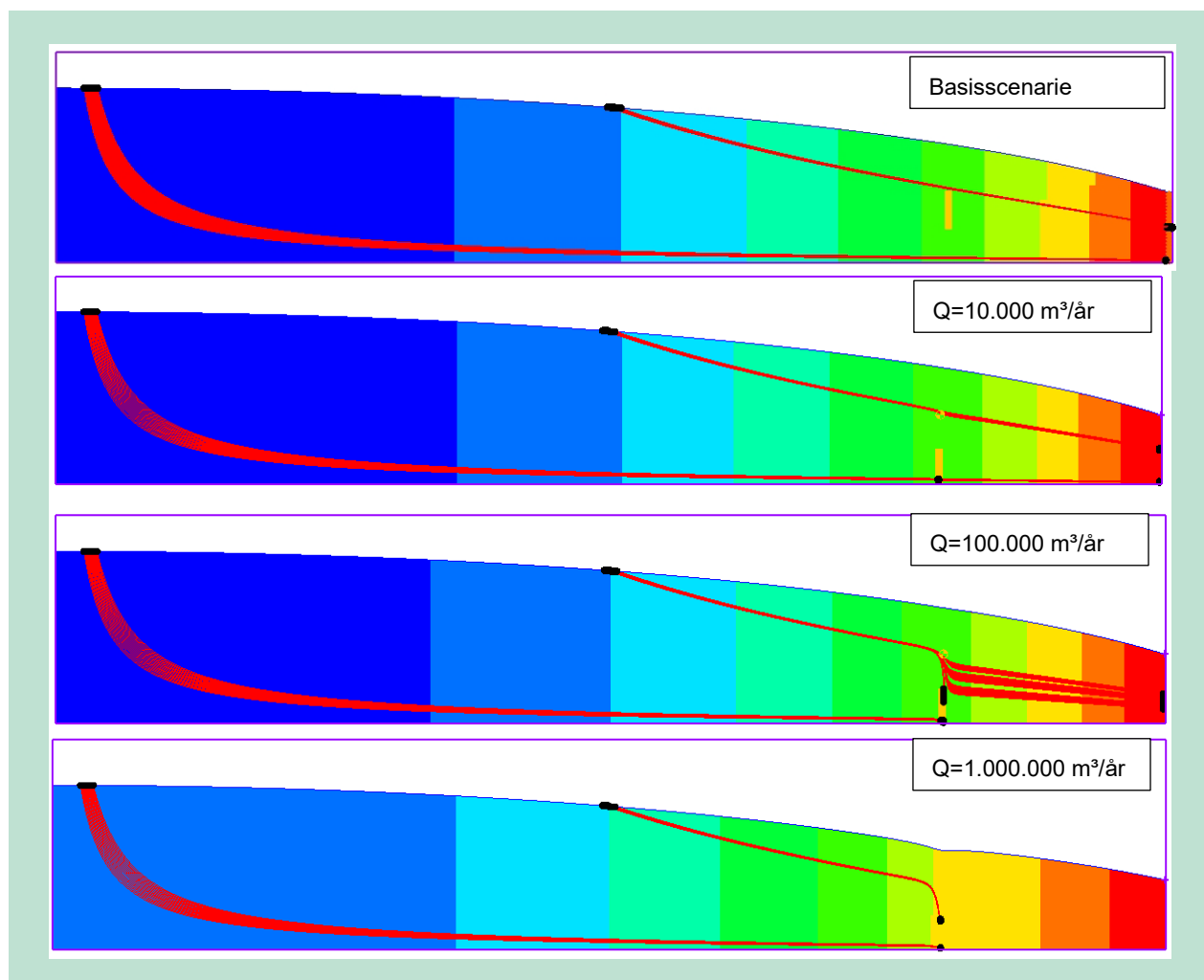
Når infiltrationen reduceres betyder en mindre pumperate også noget for opholdstiden i systemet, der allerede ved 100.000 m³/h reduceres fra 400 år til 380 år for øvre kilde, og fra 400 år til 330 år ved oppumpning på 1.000.000 m³/år.

Indvindingens størrelse spiller dermed kun en lille rolle på partikelbanernes form omkring kildeområderne, mens den kan være markant i området omkring selve oppumpningen.

6.3.4 Effekt af placering af filter i dybden

Udover pumperaten kunne det tænkes at dybden for indtaget har en indflydelse på partikelbanerne. Dette er forsøgt teste ved at flytte filteret i modellen ned i bunden af modellen, dvs. til dybden kote -10 til -20. Parameteropsætningen er i øvrigt som i det foregående scenarie.

Resultatet af beregningen på partikelbanerne er vist i Figur 6-11. Som det fremgår af figurerne, er der ingen stor påvirkning af partikelbanerne, heller ikke når man flytter filteret længere ned i lagserien. De tilsvarende partikelbaner, hvor filteret sidder i kote 0 til -10 er vist i FIGUR 6-9. Eneste umiddelbart visuelle forskel er knyttet til den helt lokale depression af trykniveauet i toppen af magasinet lige ved filteret, hvor et højere placeret filter betyder en større lokal afsænkning. Herudover ses en forskel på, hvor stor en andel af partiklerne, der ender i filteret, særligt ved pumpeydelsen 100.000 m³/år er dette tydeligt.



Figur 6-11. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og med tre pumperater (10.000, 100.000 og 1.000.000 m³/år) i rækkefølge under ved en placering af filteret i kote -10 til -20.

Dybden af filteret spiller dermed kun en lille rolle i forhold til partikelbanerne ved kilderne, når pumpningen er placeret i større afstand fra forureningskilderne.

6.3.5 Effekt af højerpermeable lag i lagfølgen

En af de oprindelige teser i forhold til hvorfor faner dykker er tilstedeværelse af lag med højere ledningsevne i lagfølgen. I modellen er dette testet i en række scenarier, hvor der er valgt en kontrast på hhv. 10 gange og 100 gange højere ledningsevne i forskellige niveauer. Niveauerne testet i modellen er hhv. kote 12-10, 4-2 og -10 til -8, der samtidig gennemskærer niveauet for indtaget i filteret. I scenarierne er det valgt, at der pumpes med 100.000 m³/år fra filteret.

I første simulering blev der valgt en K i det højerpermeable lag, der blot var 10 eller 100 gange højere end den, der var anvendt i baggrundsscenariet. Dette bevirkede, at det generelle trykniveau i hele domænet faldt voldsomt og dermed at sammenligningen med basisscenariet blev vanskeliggjort. Det blev derfor besluttet at regulere på ledningsevnerne, så den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne over den mættede zone ved vandspejlet var den samme som i basisscenariet (samme transmissivitet). På denne måde er den visuelle sammenligning med basisscenariet mulig at udføre.

Parametrene i beregningen er vist skematisk i Tabel 4 og Tabel 5.

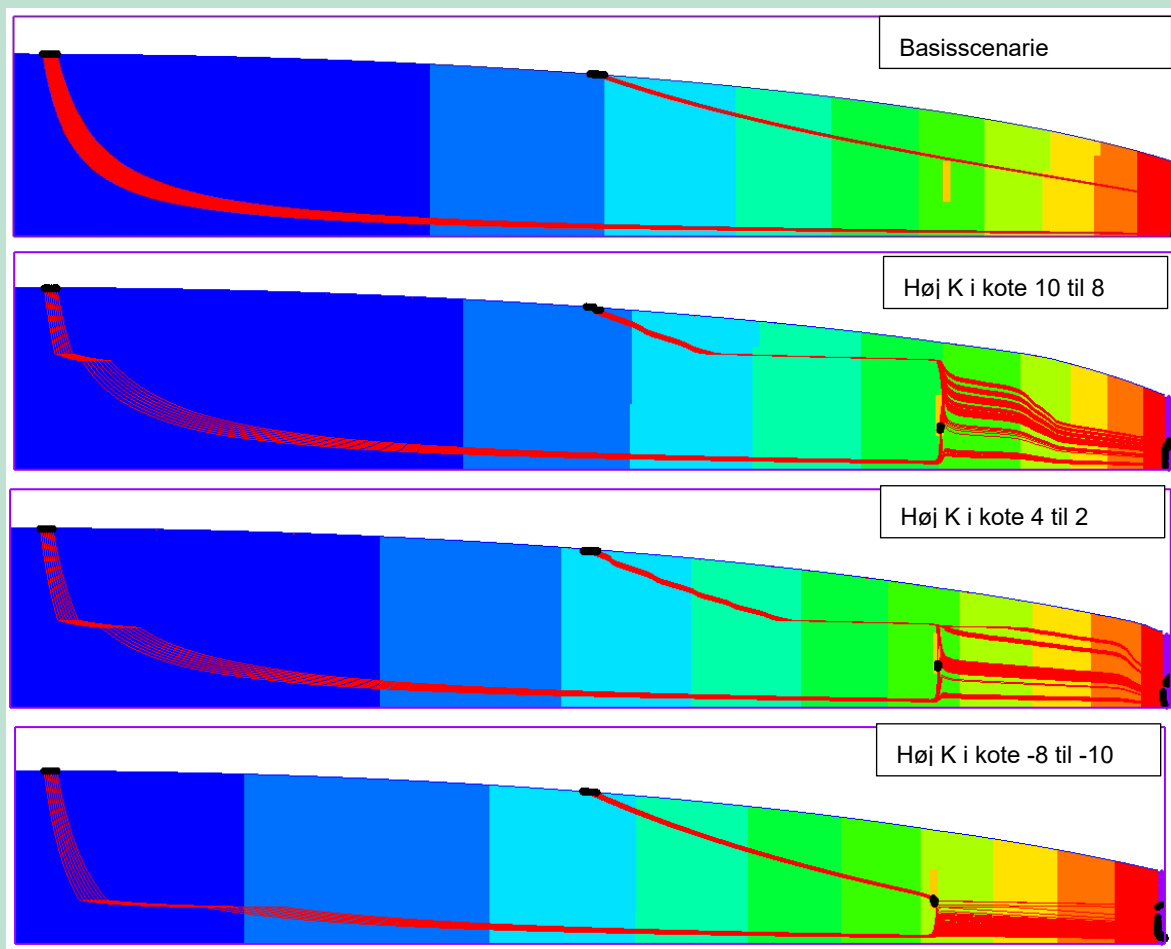
Tabel 4 Parameterkonfiguration ved en kontrast mellem høj og lavpermeable lag på faktor 10

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør (m ³ /m ² år)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K _h	1,7•10 ⁻⁴
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Ja
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	10 til 8 4 til 2 -8 til -10
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, K _h lag/K _h generel)	Faktor	10
Vertikal ledningsevne (faktor K _h /K _v)	Faktor	10
Oppumpningens størrelse (m ³ /år)	Q	100.000

Tabel 5 Parameterkonfiguration ved en kontrast mellem høj og lavpermeable lag på faktor 100

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør (m ³ /m ² år)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K _h	4•10 ⁻⁵
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Ja
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	10 til 8 4 til 2 -8 til -10
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, K _h lag/K _h generel)	Faktor	100
Vertikal ledningsevne (faktor K _h /K _v)	Faktor	10
Oppumpningens størrelse (m ³ /år)	Q	100.000

I FIGUR 6-12 er vist partikelbanerne for hhv. basisscenariet og scenarierne, hvor der er en kontrast mellem domænets gennemsnitlige K værdi og det højerpermeable lag på en faktor 10, med basisscenariet øverst og stigende dybde for det højerpermeable lag nedad.



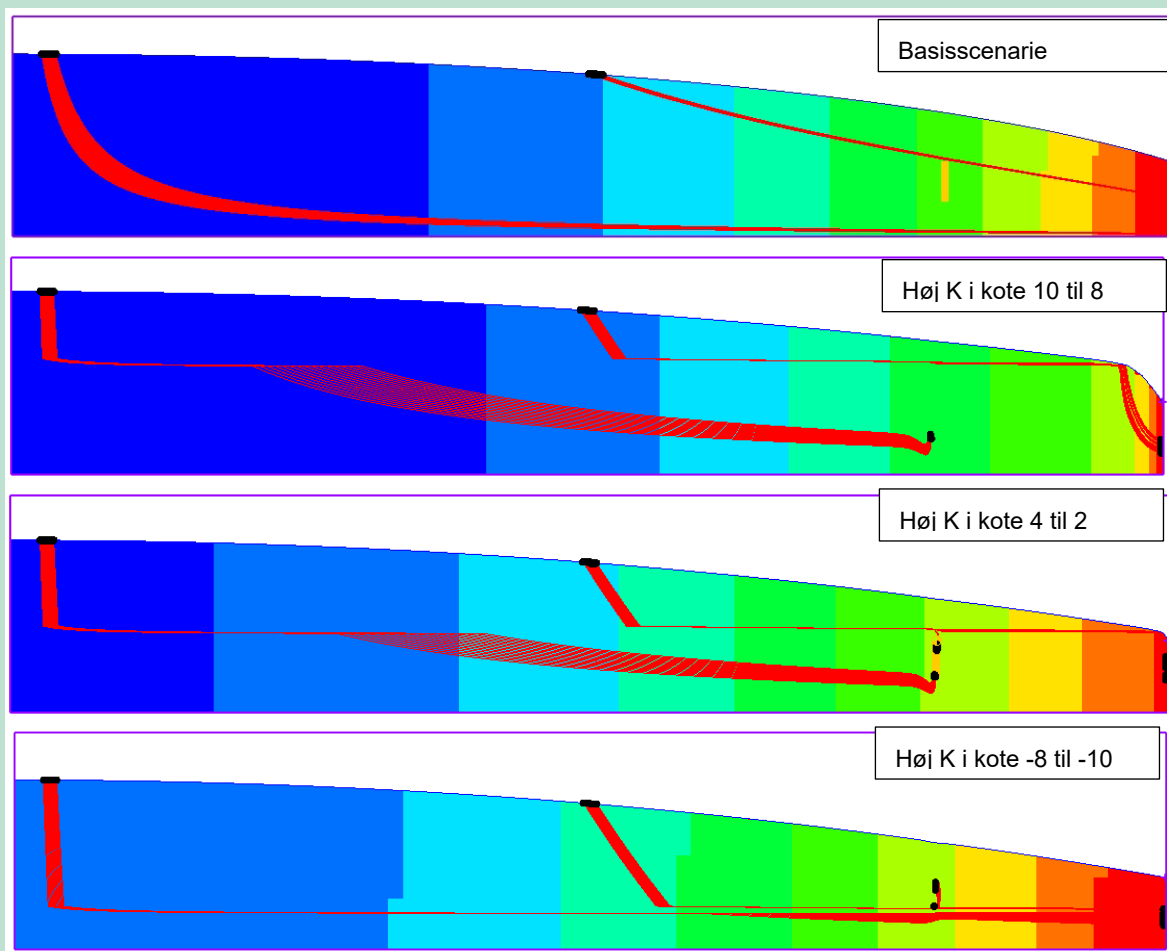
FIGUR 6-12 Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og med højpermeabelt lag (faktor 10 større ledningsevne) i hhv. kote 10 til 8, kote 4 til 2 og kote -8 til -10.

Det fremgår af figuren, at der både for den opstrøms kilde og den nedstrøms kilde er en væsentlig påvirkning af partikelbanerne.

For den opstrøms kilde observeres en kraftigere dykkende partikelstrøm ned til laget, hvori ledningsevnen er højere. Herefter følger partikelstrømmen det højpermeable lag i en periode, inden den dykker endnu længere ned i modelområdet. Spredningen i det højpermeable lag længdemæssigt er størst, når laget ligger dybest.

For den nedstrøms kilde ses også en effekt på partikelbanen, dog mindre udtalt end for den opstrøms kilde. I tilfældet hvor det højpermeable lag ligger øverst foregår partikelstrømningen her helt hen til filteret, hvor partiklerne tager en mere lodret bane og en del formentlig ender i oppumpningen. I scenariet med oppumpning af 100.000 m³/år, hvor der ikke er nogen højpermeable lag, ender alle partikler i pumpeboringen, se evt. FIGUR 6-9. Samme tendens observeres i scenariet hvor det højpermeable lag er lige over filteret. I scenariet hvor det højpermeable lag ligger i bunden af filterintervallet ses det, at partiklerne ender i bunden af filteret, hvor det i scenariet med pumpning uden højpermeable lag (FIGUR 6-9) ender i toppen af filteret. Herudover ses der nedstrøms filteret en spredning af partiklerne over hele dybden.

Resultaterne fra simuleringen med en kontrast på faktor 100 mellem det højpermeable lag og domænet generelt er vist på Figur 6-13.



Figur 6-13. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og med højpermeabelt lag (faktor 100 større ledningsevne) i hhv. kote 10 til 8, kote 4 til 2 og kote -8 til -10.

Som det fremgår af figurene, er den lodrette transport her endnu mere dominerende, end hvis kontrasten mellem ledningsevnerne er en faktor 10. I tilfældet hvor det højpermeable lag skærer filteret i indvindingen, bliver partiklerne stort set i laget helt frem til indvindingsboringen. For den nedstrøms kilde ses også i dette tilfælde en voldsom effekt på den vertikale transport, uagtet hvor i lagserien det højpermeable lag befinder sig. Effekten er dog stadig mindre for den nedstrøms kilde 2 i forhold til de opstrøms kilede 1.

Scenarierne er også afviklet hvor anisotropifaktoren (K_h/K_v) er sat til 1 frem for 10. Scenariet er ikke vist, men partikelbanerne er i dette tilfælde stort set identiske med det, der er præsenteret i FIGUR 6-12 og Figur 6-13.

Samlet set ses en kraftig effekt på spredningsmønstret, når der introduceres højpermeable lag i lagfølgen. Effekten øges, når kontrasten mellem ledningsevnerne øges. Lidt mod forventning forlader partiklerne de højpermeable zoner nedadtil efter en vis horisontal transport. Et interessant fænomen kan observeres for den nedstrøms kilde, idet oppumpningen ikke fanger partiklerne centralt på strømningsvejen. Typisk opfatter vi oppumpning som et todimensionalt tilfælde, hvor indfangningsbredden for en oppumpning er et produkt af gradient, transmissivitet og pumpeydelse. Dette gælder "kun", hvis filteret dækker hele lagserien. Resultaterne her indikerer, at man skal være meget forsigtig med at anvende partiel filtersætning, både for indfangning ovenfra og nedefra.

6.3.6 Effekt af barrierer i lagfølgen

Der er udført en test på, hvilken effekt en pludselig afsnøring af et høppermeabelt lag betyder for transporten af partikler. Dette kan ske både ved krydsning af lag med finere sedimenter eller ved foldninger geologisk set.

I modellen er der taget udgangspunkt i scenariet, hvor der er et høppermeabelt lag med en faktor 100 i kontrast, dvs. ledningsevnen i laget er $4 \cdot 10^{-3}$ m/s over to meter. I afstanden $X=2000$ - 2500 m er ledningsevne i laget sat til samme værdi, som i den omgivende del af magasinet dvs. $4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Parametrene for scenariet er vist i Tabel 6.

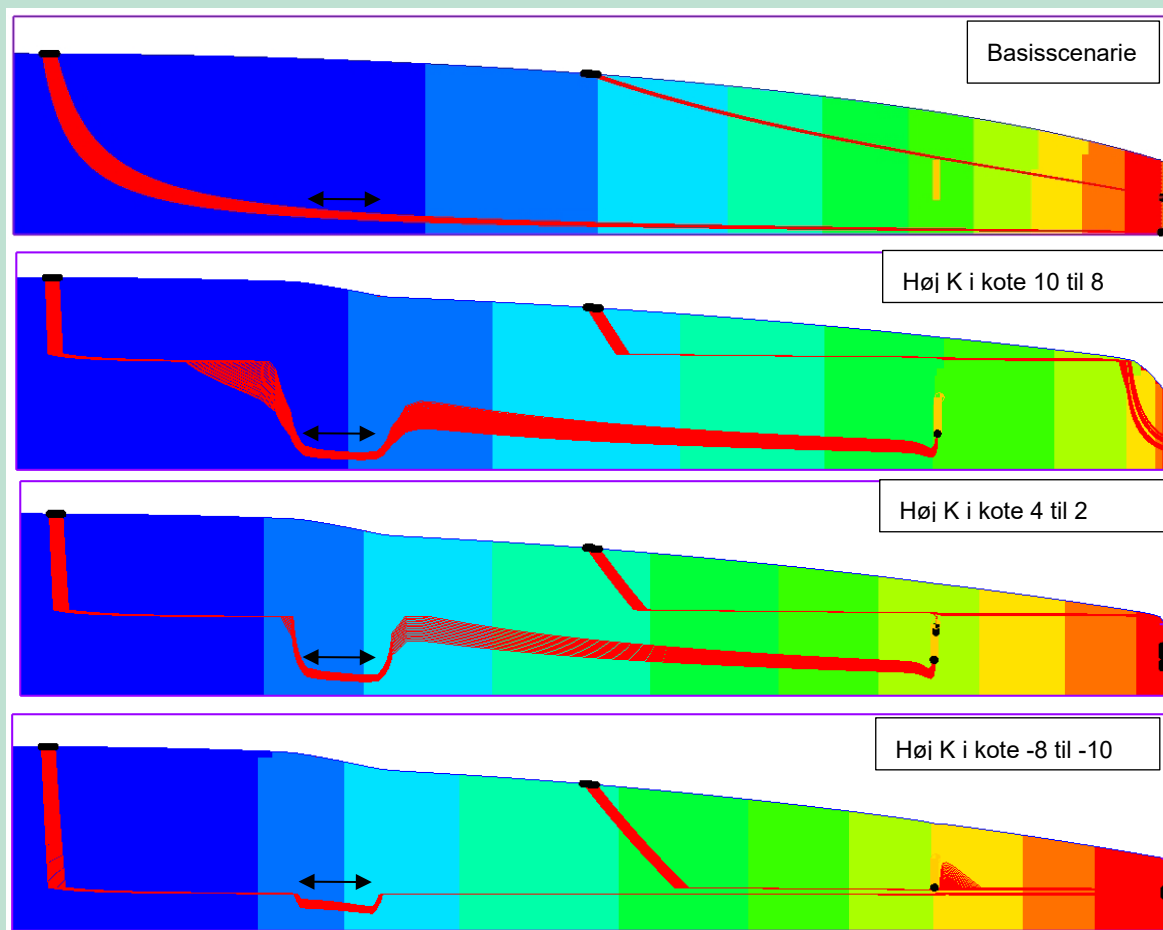
Tabel 6 Parameterkonfiguration ved en kontrast mellem høj og lavpermeable lag på faktor 100 og en barriere i afstanden $X=2000$ - 2500 m

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør (m^3/m^2 år)	N	0,25
Horisontal ledningsevne (m/s)	K_h	$4 \cdot 10^{-5}$
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Ja
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	10 til 8 4 til 2 -8 til -10
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, K_h lag/ K_h generel)	Faktor	100
Vertikal ledningsevne (faktor K_h/K_v)	Faktor	10
Barriere i 2000-2500 m	K_h	$4 \cdot 10^{-5}$
Oppumpningens størrelse ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q	100.000

I Figur 6-14 er vist partikelbanerne i scenariet med basisscenariet øverst. Som i scenariet, hvor der ikke sker en afbrydelse af det høppermeable lag (se Figur 6-13), ses der en voldsomt dykkende fane tæt på kildeområdet for den opstrøms kilde. Her påvirker barrieren ikke forløbet. Generelt ses der en stejlere horisontal gradient ved introduktionen af barrieren ved denne ift. forløbet uden, da den samlede T-værdi i magasinet reduceres, og gradienten derfor øges tilsvarende, for at samme vandmængde kan strømme igennem tværsnittet.

I alle tre tilfælde ses det umiddelbart, at partiklerne ved mødet med barrieren presses voldsomt ned. Det er tankevækkende, at den trods alt relativt svage vertikale gradient i systemet forhindrer partikelstrømmen i at bevæge sig opad i systemet. Ligeledes er det overraskende, at partiklerne ikke bare fortsætter delvist i samme niveau som det høppermeable lag, men dykker i så udpræget grad. I alle tre tilfælde ses ligeledes, at partiklerne strømmer opad på bagsiden af barrieren, mod den høppermeable zone. Der sker herved en spredning af partikelstrømmen, særligt i de to tilfælde, hvor den høppermeable zone ligger over indtaget for filteret. I tilfældet, hvor filteret skærer den høppermeable zone, fortsætter partiklerne i denne.

Sammenfattende ses en tydelig effekt på partikelbanerne ved introduktion af en barriere i det høppermeable lag. Omkring barrieren ses kraftigt dyk på fremsiden af barrieren og tilsvarende en opstigning nedstrøms barrieren.

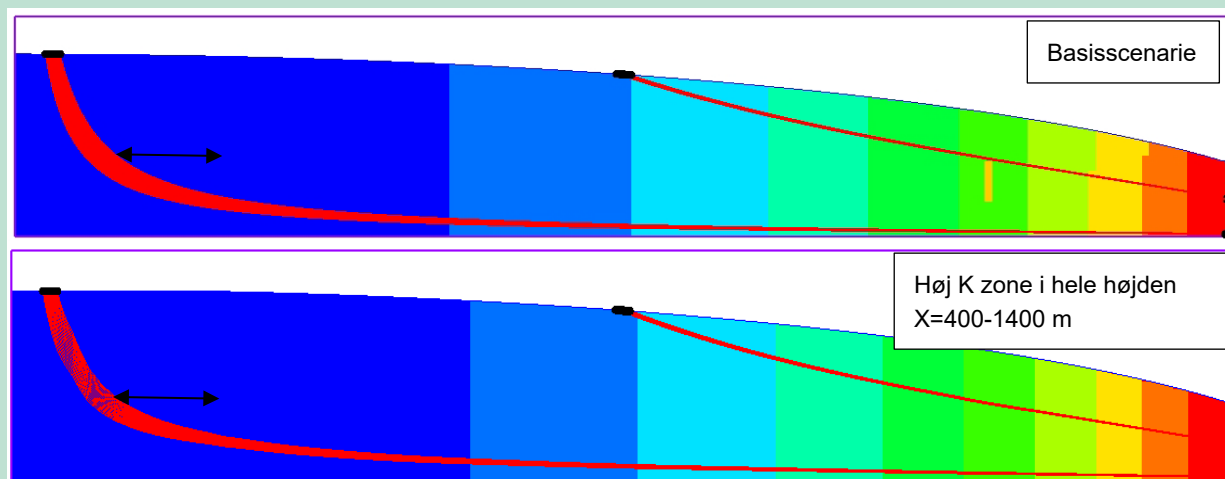


Figur 6-14. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og med højpermeabelt lag (faktor 100 større ledningsevne) i hhv. kote 10 til 8, kote 4 til 2 og kote -8 til -10. I $X=2000-2500\text{m}$ (markeret med pile på plottene) er det højpermeable lag erstattet af et lag med samme ledningsevne som generelt i domænet.

6.3.7 Effekt af en højpermeabel zone på tværs af strømningsretningen

I lighed med muligheden for en barriere, dvs. en pludselig reduktion i ledningsevnen, er det testet, hvilken indflydelse en pludselig ændring i både den vertikale og horisontale ledningsevne vil have på partikelbanerne. Dette er udført ved at indsætte en zone i afstanden $X=400-1400\text{m}$ hvor ledningsevnen er 10 gange højere end i resten af domænet. For at sikre, at udgangspotentialet ved den vestlige rand er holdt i kote 30, er den hydrauliske ledningsevne i scenariet justeret.

Partikelbanerne er vist i Figur 6-15. Det fremgår af figuren, at den horisontale gradient i scenariet med den højpermeable zone er lidt mindre end i basisscenariet, specielt henover den højpermeable zone. Selve partikelbanen påvirkes, i modsætning til hvis det er en barriere, kun marginalt, og spiller dermed ikke en større rolle for spredningen af stof fra den opstrøms kilde.



Figur 6-15. Partikelbaner i basisscenariet (øverst) og herunder scenariet med en højpermeabel zone i X=400-1400 m (markeret ca. med pile) over hele bredden og højden af domænet.

6.3.8 Effekt af ændrede nedsivningsforhold i kildeområdet

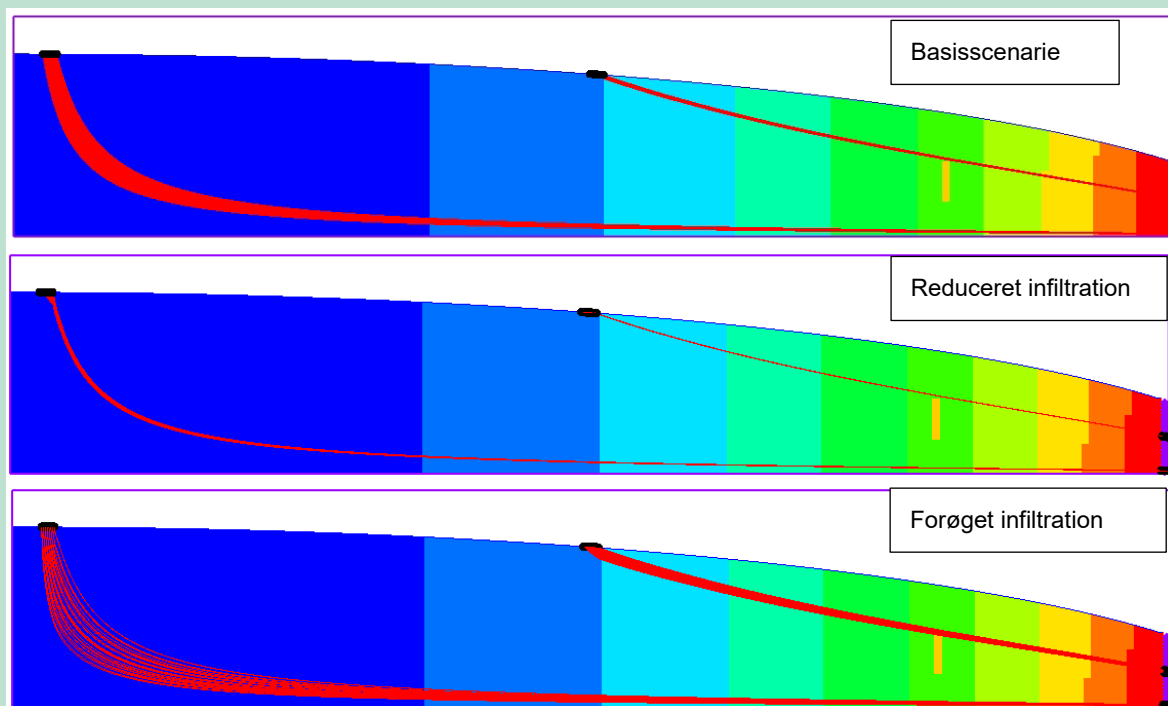
Modellen er testet for betydningen af ændrede nedsivningsforhold lokalt ved kildeområderne. Dette svarer til fx befæstelse ved kildeområdet i form af bygninger, asfalt etc. ift. en mere generel åben jordskorpe, hvor forventningen vil være en reduceret infiltration ved befæstelse. Det modsatte fænomen, med en større grundvandsdannelse end generelt i modellen kan fx ske ved tilstedeværelse af faskiner over kildeområder. Faskiner anvendes typisk til nedsivning fra tagflader, vejarealer etc. hvorved evapotranspirationen fra almindelig plantedækket jord elimineres eller reduceres kraftigt. Der er på den baggrund testet to scenarier, et hvor infiltrationen i kildeområderne er reduceret til $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (1/10 af den generelle nedsivning) og et hvor infiltrationen er øget til $0,75 \text{ m}^3/\text{m}^2$ år (stort svarende til nedbøren), hvilket er 3 gange den generelle infiltration. I Tabel 7 er samlet de indgående parametre i de modellerede scenarier.

Tabel 7 Parameterkonfiguration ved modellering af effekt af ændring i de lokale nedsivningsforhold

Beskrivelse	Parameter	Værdi
Nettonedbør (m^3/m^2 år)	N	0,025 i kilde 0,75 i kilde 0,25 generelt
Horizontal ledningsevne (m/s)	K_h	$4 \cdot 10^{-5}$
Variation i ledningsevne over dybden (-)	-	Nej
Dybde for variation i ledningsevne (kote)	Kote	-
Kontrast i ledningsevne mellem lag (faktor, $K_h \text{ lag}/K_h \text{ generel}$)	Faktor	-
Vertikal ledningsevne (faktor K_h/K_v)	Faktor	10
Oppumpnings størrelse ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q	0

Partikelbanerne i de to scenarier er vist sammen med basisscenariet i Figur 6-16.

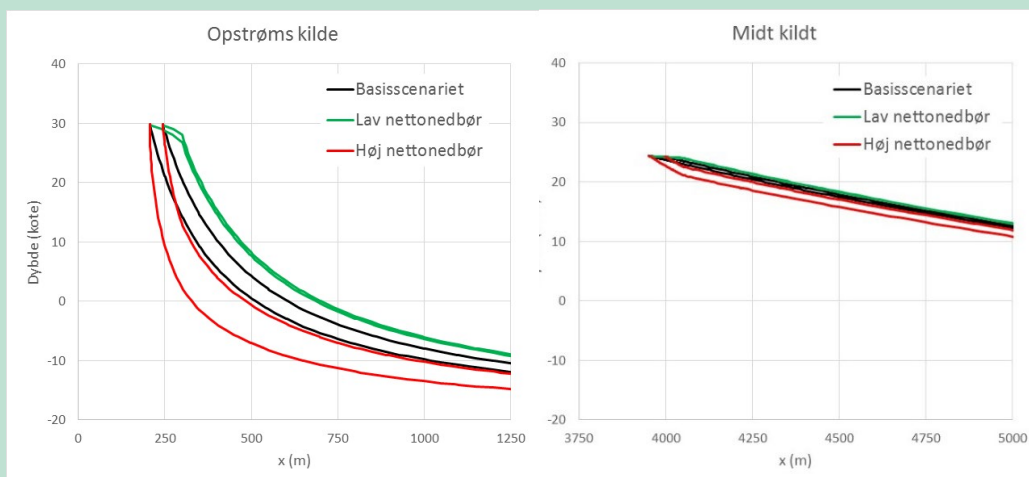
Som det fremgår af figuren, bevirker en lokal reduktion af infiltrationen, at partikelbanerne bliver lidt mere flade end i basisscenariet. Omvendt giver en øget lokal infiltration, at fanen dykker mere end i basisscenariet helt lokalt.



Figur 6-16. Partikelbaner i basisscenariet (øverst), herunder scenariet med reduceret nedsvivning i kildeområderne ($0,025 \text{ m/år}$) og nederst scenariet med høj infiltration i kildeområderne ($0,75 \text{ m/år}$)

Effekten af den ændrede lokale infiltration er overordnet ikke meget markant, men dog synlig. Effekten er størst ved den opstrøms kilde. Der ser også ud til at være en effekt, der bevirker en større spredning i partiklerne, ved den højere lokale infiltration.

Der er vist et udsnit (zoom in) af partikelbanerne i Figur 6-17. Her ses effekten på den opstrøms kilde noget mere tydeligt.

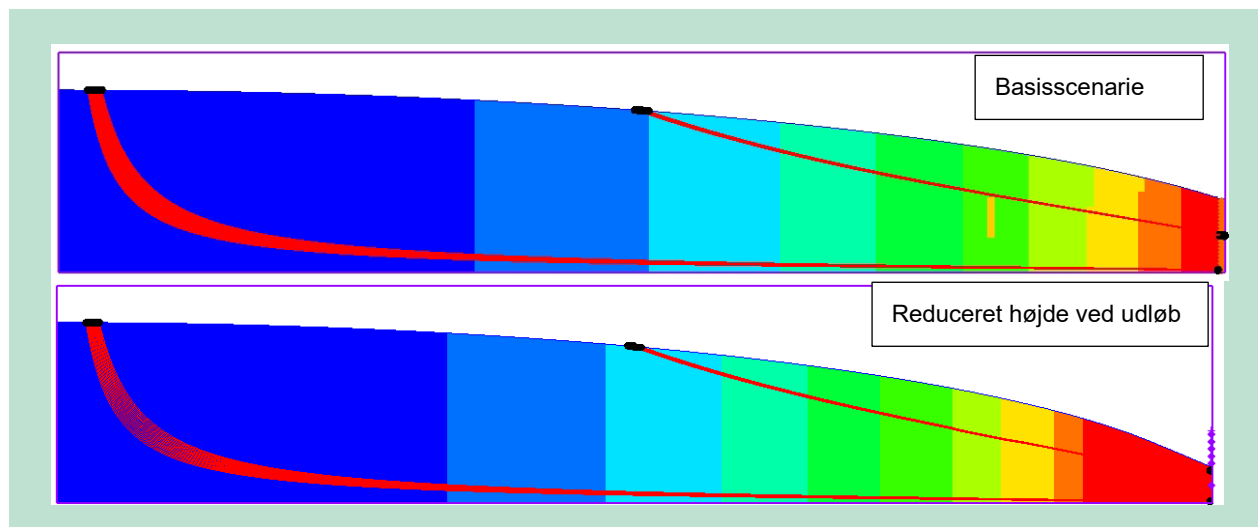


Figur 6-17. Nærbillede af partikelbanerne ved ændring af infiltrationen lige ved kilden for hhv. den opstrøms og den midt-placerede kilde.

6.3.9 Effekt af reduceret højde ved udløbet i recipient

En parameter, der også kan tænkes at have en effekt, er mægtigheden af magasinet ved udløbet i en recipient. I basisscenariet er det valgt, at der er 20 m hvorover grundvandet i princip strømmer ud i recipienten. På den baggrund er det valgt at teste, hvad en halvering af højden ved udløbet vil medføre.

Partikelbanerne for hhv. basisscenariet og scenariet med reduceret højde i udløbet er vist i Figur 6-18. Det fremgår, at den horisontale gradient øges ved reduktion i højden af udløbet (samme vandmængde skal ud over halv højde, så gradienten er den dobbelte af basisscenariet ved udløb). Partikelbanerne påvirkes i begrænset omfang. I dette tilfælde ses den største effekt på den nedstrøms kilde, hvilket er samstemmende med området, hvor der er de største forskelle mellem gradienterne i de to scenarier. Effekten er dog relativt begrænset.



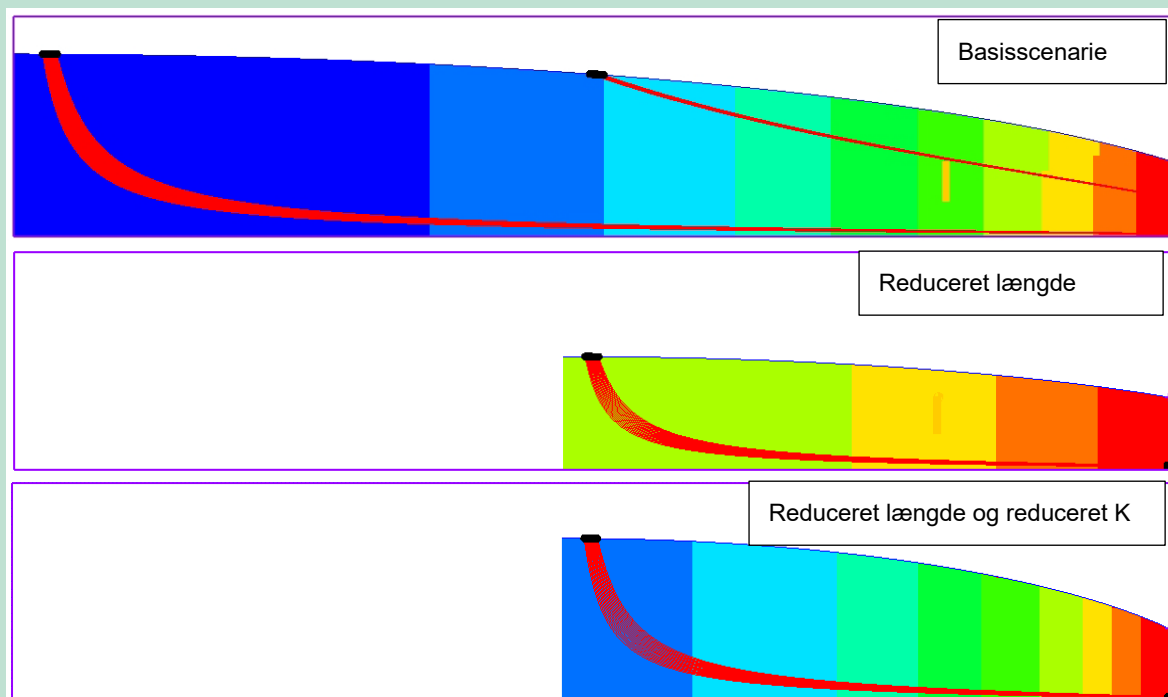
Figur 6-18. Partikelbaner i basisscenariet øverst og scenariet med reduceret højde i udløbet.

6.3.10 Effekt af længden af domænet

Ligesom højden af udløbet kunne tænkes at have en indflydelse på partikelbanernes forløb, kan det også tænkes, at længden af domænet kan influere på partikelbanernes form. Dette er forsøgt belyst ved korte længden af domænet ned fra 8000 m til 4200 m (svarende til en halvering), således at den tidligere nedstrøms kilde nu er 200 m fra det vestlige vandskel. De øvrige parametre er fastholdt som i basisscenariet.

Partikelbanerne i basisscenariet og "det lave" scenarie er vist i Figur 6-19. Som det fremgår af figuren, observeres helt generelt et mere fladt potentiale (mindre vand der skal igennem området). Den nedstrøms kilde er nu tæt på vandskellet og får dermed et forløb, der meget ligner den opstrøms kilde i basisscenariet, med en meget lokalt dykkende kilde. Effekten tolkes til at være knyttet til afstanden til vandskellet nærmere end forkortning af modeldomænet.

Det er også testet om højden på selve vandspejlet har en indflydelse i det kortere scenarie. For at opnå samme trykhøjde ved vandskellet i det korte scenarie som i basisscenariet er den hydrauliske ledningsevne reduceret til $8,6 \cdot 10^{-5}$ m/s. Partikelbanerne for dette scenarie ses nederst i Figur 6-19.



Figur 6-19. Partikelbaner i basisscenariet øverst, herunder partikelbane i et scenarie, hvor længden af domænet er reduceret til ca. halv længde. Nederst er vist partikelbanen for den nedre kilde, når ledningsevnen er reduceret så trykhøjden i opstrøms rand er den samme som i basisscenariet.

6.4 Evaluering af resultater af kørsler/scenarier

6.4.1 Væsentligste konklusioner fra modellen

De forskellige scenarier viser i hovedtræk følgende konklusioner:

- Placeringen af kilden i forhold til vandskellet har en dominerende indflydelse på partikelbanernes form fra en given kilde. Jo tættere kilden er på et vandskel, desto mere dykker fanen.
- Tilstedeværelsen af højpermeable lag i lagfølgen får faner til at dykke hurtigere, end i homogene magasiner. Jo større kontrast i den hydrauliske ledningsevne, der er i den højpermeable zone i forhold til det omgivende sediment, desto større er effekten. Ved en faktor 10 i kontrast er effekten tydelig, og ved en faktor 100 er den dominerende for transporten.
- Barrierer i lagfølgen, i form af reduceret hydraulisk ledningsevne, hvor partiklerne strømmer, bevirker et karakteristisk dyk i partiklerne. På bagsiden af barrieren ses en "opstigning" igen, dog ikke nødvendigvis til samme dybde som før barrieren. Der ses endvidere en tendens til at partiklerne i højere grad spredes rumligt ved introduktion af barriere.
- Størrelsen af anisotropien (K_H/K_V) har kun marginal indflydelse på partikelbanerne.
- Oppumpning i større afstand fra kilderne har kun marginal effekt på partikelbanerne, uagtet om filteret er placeret i større dybde eller højere i lagfølgen. Indfangningen af partiklerne ved selve boringen påvirkes derimod af både filterets placering og pumpemængden.
- Lokalt reduceret nedsivning giver mindre dykkende fane, større lokal nedsivning ved kilderne giver kraftigere dykkende fane. Der ses endvidere en tendens til at partiklerne i højere grad spredes rumligt ved større infiltration.
- Længden af domænet og højden af magasinet ved udløbet har ret begrænset indflydelse på partikelbanerne.

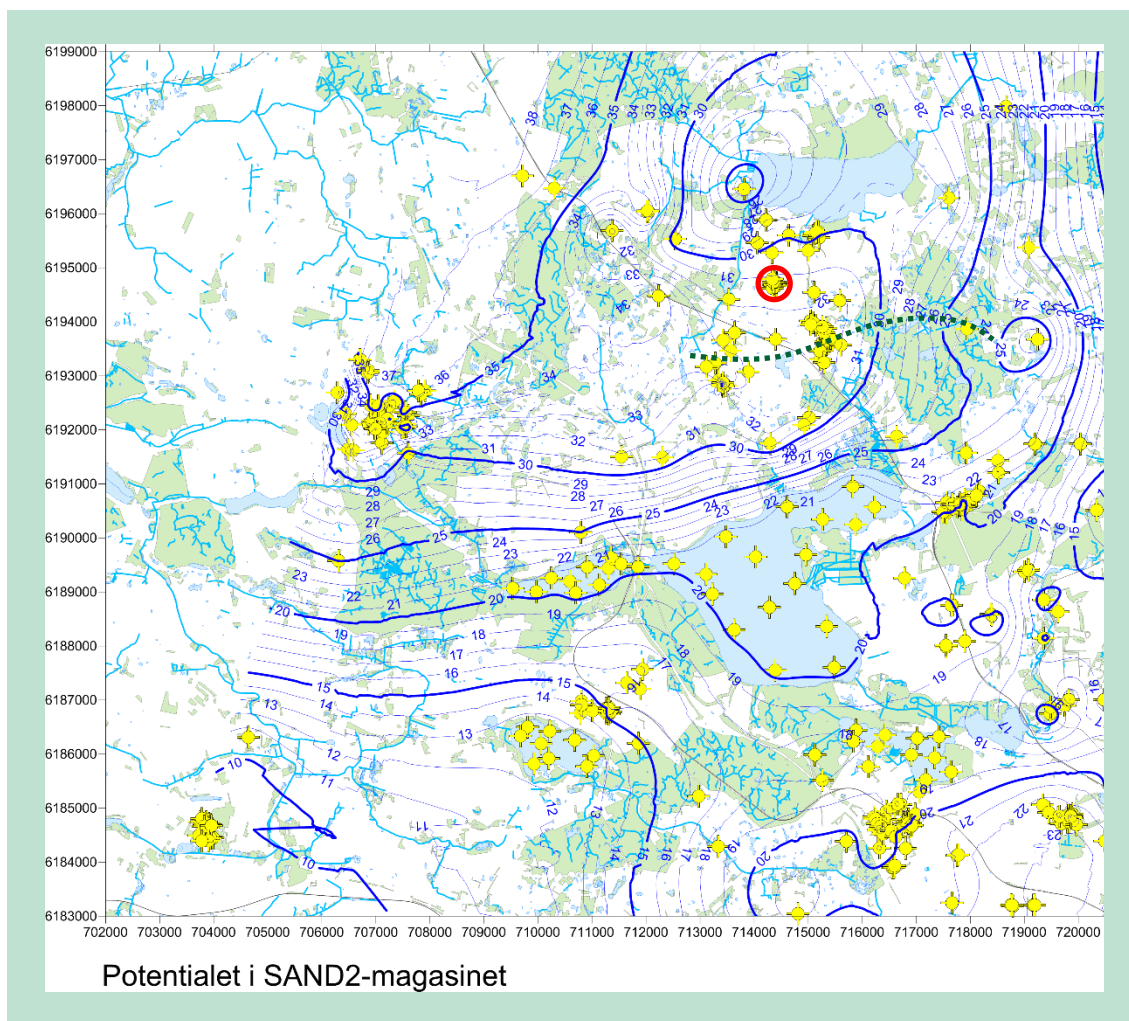
Udover disse konklusioner er det også væsentligt, at de beregnede vertikale gradienter i systemet ved standardforudsætningen omkring K_h/K_v på en faktor 10 er så små, at de i praksis ikke kan måles med de metoder, vi normalt anvender til måling af vandspejl.

6.4.2 Modelresultater set ift. de tidligere beskrevne eksempler

Der er i afsnit 5.2 beskrevet 4 eksempler ift. observation af dykkende faner. Disse belyses i dette afsnit ift. til de konklusioner, der er uddraget fra modelkørslerne.

6.4.2.1 Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Birkerød Kongevej 158

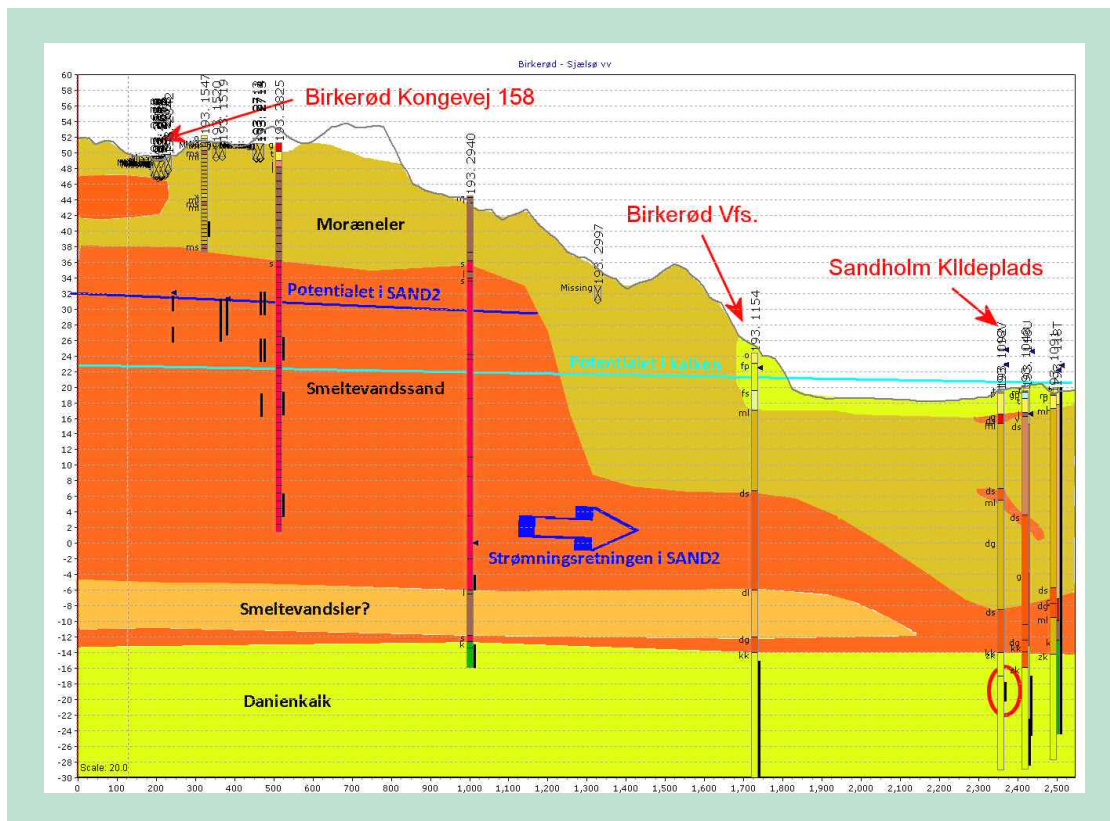
Birkerød Kongevej 158 er overordnet karakteriseret ved at ligge stort set midt mellem vandskellet og den nærmeste recipient, se Figur 6-20. Der er således ikke i dette tilfælde en overensstemmelse mellem placeringen ved vandskel og en dykkende fane.



Figur 6-20. Tolkede potentialer i Sand 2 magasinet ved Birkerød. Placeringen af Birkerød Kongevej 158 er markeret med rød ring. Gule pletter er borer anvendt til bestemmelse af potentialeforholdene. Den stiplede kurve indikerer placeringen af vandskellet ved Birkerød Kongevej 158.

Betragtes geologien og de hydrauliske ledningsevner nær kilden, se evt. Figur 5-1, kan der observeres en klar tendens til at ledningsevnen er væsentlig større i bunden af magasinet end i toppen. Baseret på de udførte slugtest er der tale om ca. en størrelsesorden større ledningsevne i bunden sammenlignet med toppen af magasinet. Baseret på senere erkendelser omkring de forskellige målemetoder er det sandsynligt, at kontrasten er endnu større, og dermed at disse forhold kan medføre til en dykkende forureningsfane.

Udover dette ses en meget tydeligt barriere i form af moræneler, der blokerer for store dele af vandtransporten. Dette er illustreret på Figur 6-21. Barrieren kommer ca. 1.000 m nedstrøms for lokaliteten, hvor magasinet generelt indskrænkes i højden, til omkring en halvering. Dette forhold kan ligeledes medvirke til at fanen dykker.



Figur 6-21. Geologisk snit fra området ved Birkerød Kongevej 158 mod Sjælsø og Sandholm Kildeplads, fra syd mod nord.

Den opstillede teoretiske model afspejler ikke helt dette scenarie, men de principielle effekter er formentlig sammenlignelige med det der observeres i Figur 6-14, særligt 2. figur fra toppen. Her ses effekten af opstuvning højere oppe i magasinet, hvor partiklerne allerede dykker i god afstand fra selve barrieren i modellen.

Sammenfattende vurderes den mest sandsynlige forklaring på den dykkende fane på Birkerød Kongevej 158 derfor primært at skyldes den barriere, der er umiddelbart nedstrøms og i mindre omfang den generelt stigende ledningsevne over dybden.

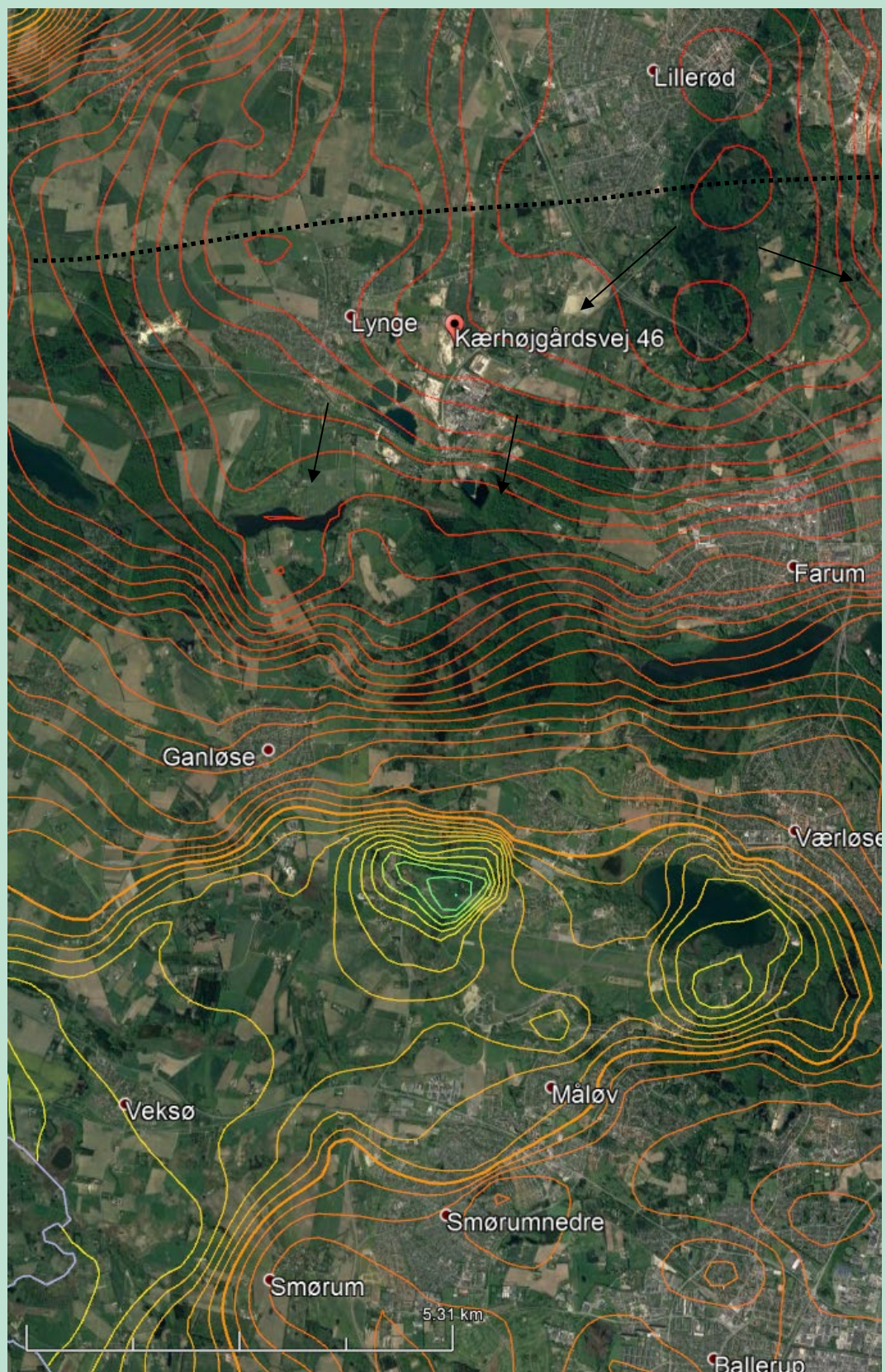
6.4.2.2 Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Ravnsbjergvej 1

Ravnsbjergvej 1 har alle karakteristika, der betinger en dykkende fane, når man tager modelresultaterne i betragtning. Lokaliteten ligger stort set på et vandskel, ca. 300 m nedstrøms kilden er der en fysisk barriere i form af et morænelerslag, og der er herudover konstateret et lag i bunden af sandmagasinet, der er knap 2 størrelsesordener højere i ledningsevne end den overliggende sekvens. Dette betyder, at det også er den lokalitet, hvor den stejlest dykkende fane er observeret.

6.4.2.3 Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Kærhøjgårdsvej 46

Kærhøjgårdsvej er beliggende meget langt opstrøms i oplandet, dvs. forholdsvis tæt på vandskellet, uden at ligge helt i det, når man betragter Region Hovedstadens overordnede regionale kort for trykniveauet i det primære magasin (kalken, der i området står i kontakt med

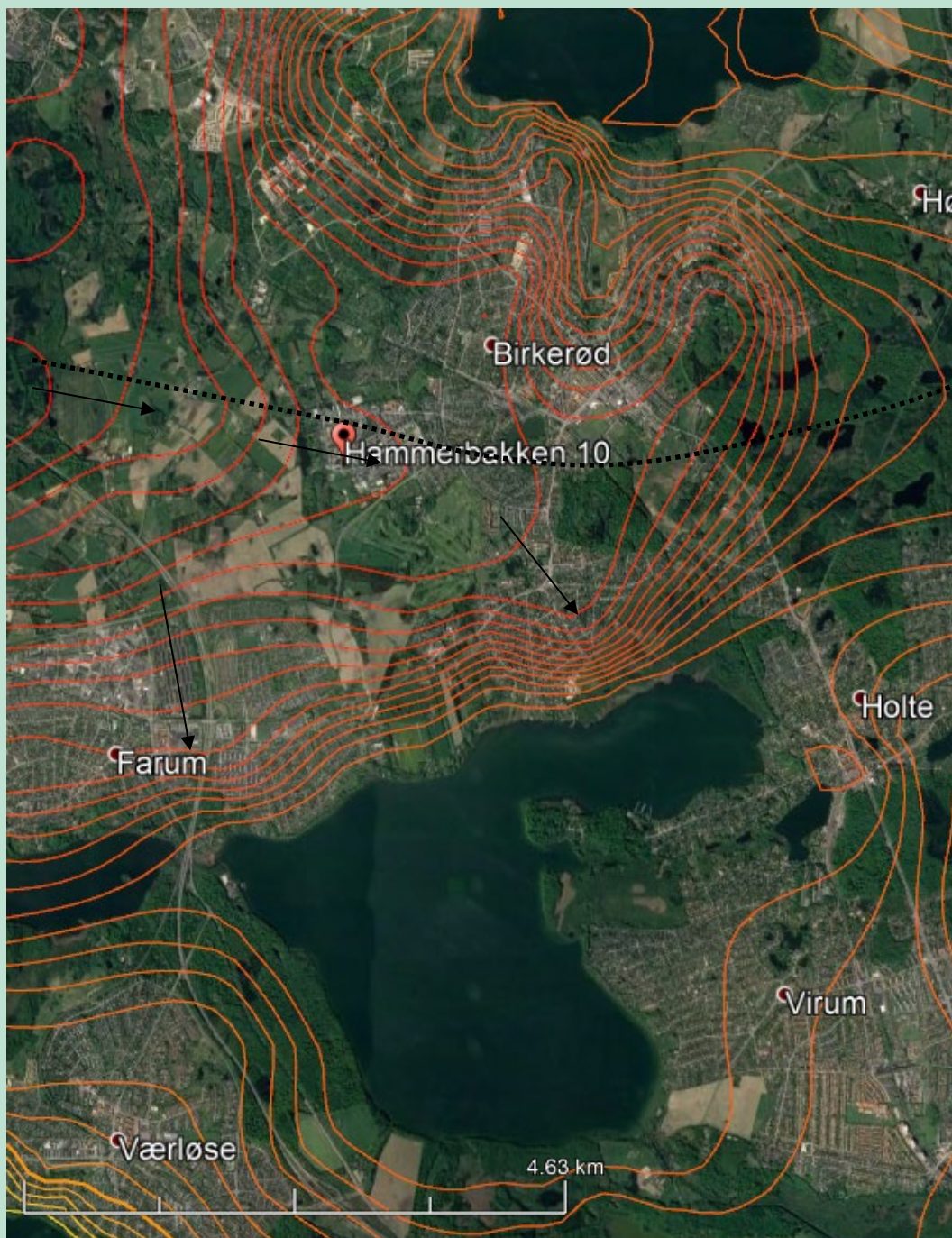
sandlaget). Det overordnede potentialekort fremgår af Figur 6-22. Afstanden til de højeste trykniveauer er omkring 1.000-1.500 m. Der er som på en række af de øvrige lokaliteter også konstateret højere ledningsevne i sedimenterne i dybden, formentlig omkring en størrelsesorden i kontrast (se evt. Figur 5-6).



Figur 6-22. Det overordnede potentialekort i området ved og omkring Kærhøjgårdsvej 46. Om-
trentlig placering af vandskel angivet med sorte prikker. Strømningsretning i magasin angivet
med sorte pile. Ækvistans på potentialelinjer er 1 m.

Ved denne lokalitet er der ikke umiddelbart nogen barrierer i strømningsretningen nedstrøms. Sammenfattende vurderes de to væsentligste faktorer, der betinger at fanen dykker, derfor at være afstanden til vandskellet i kombination med den højere ledningsevne i bunden af magasinet.

6.4.2.4 Vurderinger i forhold til forureningsfanen ved Hammerbakken 10



Figur 6-23. Det overordnede potentialekort i området ved og omkring Hammerbakken 10. Omrentlig placering af vandskel angivet med sorte prikker. Strømningsretning i magasin angivet med sorte pile. Ækvdistance på potentialelinjer er 1 m.

Potentialekortet for området omkring Hammerbakken 10 er vist på **Figur 6-23**. Lokaliteten ligger stort set midt mellem vandskellet og recipienten (Furesøen, alternativt Sjælsø). Ved denne

lokalitet er der ikke umiddelbart nogen barrierer i strømningsretningen nedstrøms. Der er ved sluttest konstateret en ledningsevne i bunden af lagserien, der er ca. 1 størrelsesorden højere end i toppen. Visuelt har det dog ikke været muligt at se en større forskel på prøverne i felten, baseret på optegnelser udført i forbindelse med undersøgelse af selve lokaliteten Hammerbakken 10, hvor en boring er ført helt til kalken, der ligger umiddelbart under sandet. Disse forhold giver tilsyneladende kun et mindre dyk på fanen, hvilket er sammenligneligt med det, der observeres ved modelleringen vist i **FIGUR 6-12** for den nedstrøms kilde.

Sammenfattende er der på baggrund af vores forståelse fra simuleringerne/testscenarierne et rimeligt belæg for observationerne i de 4 eksempler, som dermed har styrket forståelsen af de vigtigste faktorer for om en fane dykker, når man tager modelleringen i betragtning.

7. Undersøgelsesværkøjer og metoder til kortlægning af parametre i sandmagasiner

I dette kapitel er beskrevet hvilke undersøgelsesmetoder/værktøjer, der kan bruges til at bestemme de forskellige parametre, der er styrerende for om fanerne dykker. Her beskrives og anbefales hvordan og hvornår i undersøgelsesforløbet disse parametre bør undersøges, hvordan de skal tolkes samt krav til måletæthed for at opnå et solidt vidensgrundlag.

Der gøres særligt opmærksom på, at det er en fordel at "zoome" ud allerede fra start af i planlægningsfasen, når der skal udføres en undersøgelse på en lokalitet, hvor fanen potentielt kan spredes i et mægtigt sandmagasin, som illustreret i de forskellige modelscenarier og beskrevne cases: Dvs. der er forhold som ligger langt uden for den egentlige lokalitet, der kan være styrende for hvorledes fanen vil spredes fra lokaliteten, med fokus på den vertikale spredning.

7.1 Indledende overvejelser

De tre mest dominerende parametre, der tilsyneladende styrer, hvorvidt faner dykker mere end forventeligt eller ej er:

- Placering af kilden ift. vandskel og generelt strømningsregime,
- tilstedeværelse af barrierer i undergrunden, også i lidt større afstande,
- tilstedeværelse af højpermeable lag i større dybde.

Med dette følger, at det giver mening allerede i den indledende planlægningsfase at hæve sig op i en større skala, end hvad en undersøgelse af en kilde og dens umiddelbare nærhed normalt vil betinge, når der skal søges informationer om geologi og hydrogeologi.

Som både de præsenterede eksempler og modelleringen indikerer, er det vigtigt at forstå, i hvilket strømningsregime den kilde, man skal undersøge, befinder sig. Materiale, der er relevant at forholde sig til i denne sammenhæng, er:

- Overordnede potentialekort for de relevante magasiner, gerne på km niveau/skala.
- Terrænmodellen i nedstrøms retning. Hvad findes af eventuelle barrierer? er der pludselige terrænspring? er der kildevæld i nedstrøms skrænter osv., der kan indikere en indsnævring af strømningsprofilen eller andre indikationer på, at vandet skal presses nedad eller eventuelt opad?
- Generelle informationer om den geologiske opbygning af sandmagasinet fra dybe borer. åbne grusgrave mm., der kan fortælle om lagdeling, og særligt om tilstedeværelse af højpermeable zoner/lag, og i hvilken dybde disse træffes.

Der vil i en række tilfælde være gode muligheder allerede før der udføres undersøgelser at vurdere, om sandsynligheden for dykkende faner er stor på denne baggrund.

Herudover kan selve den lokale undersøgelse være med til at afsløre risici for dykkende faner. Som det tidligere er beskrevet, er sandsynligheden for at pejle en stor vertikal gradient, i hvad

der kan betegnes som et mildt heterogent sandmagasin, i praksis ikke til stede, hvilket betyder at man må forlade sig på indirekte mål, som fx koncentrationsmålinger i forskellig dybde.

7.2 Boringsmetoder mm.

Det er uhyre vanskeligt at få lokale informationer i dybe niveauer uden at udføre borer til stor dybde, dvs. til bunden af magasinet. Geofysiske metoder kan med deres nuværende udviklingsstade ikke fra overfladen opløse magasinets egenskaber med tilstrækkelig detaljeringsgrad, men der foregår en rivende udvikling, så det er et område, der kan forandres fremadrettet.

På lokaliteterne med en mulig risiko bør der derfor som minimum udføres én og gerne flere borer nedstrøms kildeområdet til identifikation af evt. høj permeable zoner, der kan betinge, at faner dykker.

Boringerne bør af hensyn til målinger i sedimentet udføres med så lille tilførsel af materialer som muligt, dvs. gerne som tørrotationsboringer eller endnu bedre som kerner i kerneprøvetager. Tilsætning af vand under borearbejdet bør begrænses mest muligt, både af hensyn til opslemning og fortynding af vandet i formationen. Skylleboreteknikker med vand/luft som middel til at hæve prøverne giver generelt en dårlig beskrivelse af materialet (herunder også lagfølgen), hvilket gør, at de ikke er velegnede, når man gerne vil have en god beskrivelse af sedimentet.

Anvendes sandspand og tørrotation (og også ved udtag af kerner) kan man løbende udtage prøver af sedimentet til forskellige former for vurdering. Typisk giver det god mening løbende at måle PID på det opsamlende materiale (ved undersøgelser for chlorerede forbindelser mm.) for at få et indtryk af, hvor en evt. fane er placeret i det vertikale plan. Herudover kan kornstørrelsesfordelingen anvendes til estimering af den hydrauliske ledningsevne. En anden teknik, der ligeledes kan anvendes under borearbejdet er udtag af vandprøver fra midlertidige filtre, der sættes under borearbejdet og tages op efter endt prøvetagning. Ifbm. prøvetagningen er det essentielt, at der forpumpes tilstrækkeligt til, at det er formationens vand, der rent faktisk måles på og ikke vand, der kan være tilsat under borearbejdet.

Ifbm. borearbejdet kan der i visse tilfælde ligeledes opnås yderligere information om sedimentet ved at anvende geofysisk logning, inden der filtersættes og gruskastes/forsegles. Gamma-logning kan anvendes, hvor signalet typisk er korreleret med ler/siltindholdet i sedimentet. Det samme gælder for ledningsevne-log, der ligeledes i visse tilfælde kan give information om kornstørrelsesfordelingen i sedimentet.

Boringens forureningsprofil (og evt. information om kornstørrelsesfordelingen fra prøver og logs) kan være en stor hjælp når boringen skal filtersættes. Typisk ønskes filtersætningen enten, hvor der er høje koncentrationer i fanen og/eller, hvor vandet løber hurtigt af hensyn til bestemmelse af flux/massestrøm. Længden af filtersætningen skal holdes op i forhold til formålet med boringen samt de informationer der opnås i forbindelse med borearbejdet. I nogle tilfælde vil det således give bedst mening at etablere forholdsvis korte filtre, mens det i andre kan være fordelagtigt at etablere lange filtersætninger. Eventuel vertikal spredning af forureningen via filtersætningen skal også inddrages i disse vurderinger.

7.3 Hydraulisk ledningsevne

I de følgende delkapitler er dels en beskrivelse af hydraulisk ledningsevne og fordelingen af denne generelt og dels en beskrivelse af forskellige metoder til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne.

7.3.1 Anisotropi mht. hydraulisk ledningsevne i sandmagasiner

7.3.1.1 Småskala anisotropi

Særligt i finkornede sandmagasiner er den vertikale hydrauliske ledningsevne afvigende fra den horisontale hydrauliske ledningsevne. Dette skyldes i overvejende grad småskala aflejningsstrukturer, såsom lamination, præferentiel lejrning af sedimentkorn og krydslejrning. Denne anisotropi synes at aftage med stigende kornstørrelse. Typisk ligger K_h/K_v for småskala anisotropi mellem 1 og 10 med en overvægt mellem 1 og 2 /7,8/. Det har ikke inden for projektets ramme været muligt at finde referencer til systematiske målinger af danske sandaflejringer. På mikroskala (<0,1 m) vil der imidlertid være en mindre forskel på K_h og K_v , da effekten af f.eks. lamination her er minimal, se Figur 7-1.

Som det fremgår af modelafsnittet betyder småskalavariationen i den hydrauliske ledningsevnen tilsyneladende relativt lidt for partikelbanerne ved en forureningskilde (set i en lidt større skala).



FIGUR 7-1. Skalaforhold for aflejringsstrukturer

7.3.1.2 Storskala anisotropi

Forholdene ved fluvial aflejring af større sandformationer varierer oftest over tid. Typisk ses det, at strømningsenergien falder med tiden f.eks. i forbindelse med tilbagesmeltningen af en isfront (se geologiafsnit i afsnit 5.3). Den aftagende strømningsenergi betyder, at der gradvist aflejres mere og mere finkornet materiale, det der også kaldes "fining upward" /9/. Den finere kornstørrelse opad medfører, at den hydrauliske ledningsevne aftager mod toppen af sandformationen. I situationen med glaciofluviale aflejringer foran en tilbagesmeltende isfront vil der typisk nær bunden af formationen være aflejret groft materiale af f.eks. grus og sten (bundkonglomerat), der dog hurtigt ændres til grus og groft sand opad i sekvensen. Højere i formationen aflejres mere og mere finkornet sand evt. med indslag af silt- og lerlaminæ. Den hydrauliske ledningsevne vil i denne situation aftage opad i sekvensen, typisk med meget høje hydrauliske ledningsevne nær bunden, der hurtigt aftager opad i lagpakken, indtil der i den øvre, finkornede del kun sker en mindre reduktion af den hydrauliske ledningsevne.

Da effekten af småskala anisotropi aftager med stigende kornstørrelse og skala vil storskala anisotropien set i større skala normalt være bestemmende for partikeltransporten i et større sandmagasin.

7.3.2 Metoder til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne

Bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne (K) er vigtig i forhold til at vurdere og evt. beregne stoftransport i sandede og grusede aflejringer, her særligt med henblik på at vurdere om en forureningsfane vil have en tendens til at dykke. I det følgende er de enkelte metoder beskrevet og vurderet i forhold til, hvilken hydraulisk ledningsevne, man får bestemt ved de forskellige metoder.

7.3.2.1 Pumpetests

Pumpetest er en robust metode til at bestemme den overordnede hydrauliske ledningsevne i et magasin. Ved en pumpetest påvirkes en større del af magasinet, afhængig af filterlængder og pumpetid. Ved at anvende en tolkning baseret på observationsboringer undgås effekter (2. ordens tab, skineffekt mm) af selve pumpeborings udbygning.

Ved at placere et større antal observationsfiltre i forskellig afstand fra pumpeboringen og med filtre i forskellig dybde fås en grov indikation på den vertikale variation af hydrauliske ledningsevne. Tolkning af transmissiviteten baseret på de enkelte observationsfiltre vil kunne vise om den hydrauliske ledningsevne aftager eller stiger med dybden, idet tolkningen vil afspejle transmissiviteten i det jordvolumen, der ligger imellem pumpeboringen og observationsboringen.

Ved tolkningen anvendes et egnet tolkningsværktøj, i glaciare sandmagasiner vil man typisk anvende f.eks. Theis/Hantush /12,13,14/ som løsningsberegning og som er gældende både for frie og spændte magasiner.

Et problem ved omsætning af transmissivitet til hydraulisk ledningsevne er at vurdere pumpningens rumlige effekt i magasinet. Da transmissiviteten er summationen af de hydrauliske ledningsevner over det vertikale profil som pumpningen påvirker, ligesom modellen heller ikke tager højde for eventuel anisotropi i forskellige retninger, er den udledte hydrauliske ledningsevne dermed ret usikker ved partielt filtersatte pumpeboringer. Ved omregning af transmissiviteten til en hydraulisk ledningsevne skal man kende mægtigheden af magasinet, hvilket ikke altid er tilfældet, hvorfor det kan være en udfordring.

7.3.2.2 Slug tests

Ved en slug test enten fjernes eller tilføres et legeme eller en vandmængde til boringen hurtigt (i princippet momentant). Ved filtre i dybtliggende sand med relativ høj forventet hydraulisk ledningsevne er det en egnet metode at fylde slidse- og blindrør med vand, indtil vandspejlet når terræn. Herved sikres en tilstrækkelig vandmængde til, at der kan opsamles tilstrækkelige pejledata over et passende tidsrum til en god bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne.

Selve udformningen af boringen og filterkonstruktionen har stor betydning for kvaliteten af tolkningen af slugtestdata. Af særlig betydning er skineffekt, der skyldes en lavpermeabel "hinde", der dannes under nedpresningen af forerøret, og evt. nedsivende afpropningsmateriale i gruskastningen. Herudover spiller gruskastningens kvalitet og sammensætning en stor rolle for fortolkningen. Særligt kombinationen af for fin gruskastning i grovere sedimenter kan lede til systematisk afvigelse på ledningsevnen, så den tolkes mindre end den "sande" værdi.

Ved tolkningen af slugtests kan anvendes flere beregningsmetoder (fortolkningsmodeller), typisk anvendes:

- Hvorslevs metode
- Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos metode
- Ferris-Knowles metode
- Theis (Modificeret) metode
- Bouwer-Rice metode

En evaluering af de enkelte metoder er bl.a. foretaget i /29/. Her anbefales det som udgangspunkt at anvende Bouwer-Rice metode ved tolkning i sandede aflejringer. Metoden har dog vise begrænsninger, særligt hvor vandspejlet er nær filtertoppen eller gruskastningen er forstyrret af "for lave" hydrauliske ledningsevner (gruskastningsmaterialet er for fint ift. omgivelserne).

7.3.2.3 Kornstørrelsesanalyser

Der findes en række empiriske beregningsmetode til at omsætte sedimentets kornstørrelsesfordeling til hydraulisk ledningsevne /15-27/. Basis for beregningerne er, at fraktionen af de enkelte kornstørrelser er kendt. Der er en række metoder til bestemmelsen af kornstørrelsesfraktionerne, som er beskrevet nedenfor. Hvor 90% af kornene er $>0,063$ mm, kan man alene anvende en almindelig sigteanalyse til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne. Udgør den finere del af sedimentet ($<0,063$ mm) mere end 10 %, må der tillige anvendes hydrometerforsøg eller laserdiffraktion for at få en god bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne. Sigteanalyser er en hurtig og billig metode til bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen, mens hydrometerforsøg er en tidskrævende og dyr metode. Laserdiffraktion er en meget hurtig (60 sekunder) metode til bestemmelse af kornstørrelser fra 10 nanometer til 5 millimeter. Metoden er imidlertid, så vidt vides, ikke anvendt i større omfang på sedimenter i Danmark. I udlandet er der gennemført en række undersøgelser af metoden på fluviale sedimenter /11/, der viser god overensstemmelse mellem sigteanalyser/hydrometerforsøg og laserdiffraktion.

Validiteten af sigtekornanalyser afhænger af prøvetagningsmetoden. Optimalt udføres analyserne på intakte kerner af sedimentet, hvilket kan være besværligt og tidskrævende, derfor udtages prøverne typisk fra sandspand, hvor der sker en vis sortering inden prøvetagningen. Det er derfor af stor vigtighed, at prøver fra sandspand udtages, så de er så repræsentative som muligt.

Tolkningen af kornstørrelsesanalyser kan ske efter én af de mange beregningsmetoder /15-27/. Typisk anvendes Hazen's metode, men ofte vil kornstørrelsesfordelingen ligge uden for denne metodes gyldighedsområde. Et godt redskab til beregning af hydraulisk ledningsevne er regnearket HydrogeoSieveXL, udviklet af J.F. Devlin /28/. Regnearket beregner ledningsevnen efter et stort antal metoder samt evaluerer om kornstørrelsesfordelingen ligger inden for de enkelte metoders gyldighedsområde. Figur 7-2 viser en rapportside fra HydrogeoSieveXL, hvoraf det fremgår hvilke metoder, der kan anvendes inden for de enkelte metoders gyldighedsområde. I /31/ er der foretaget en evaluering af de forskellige regnemetoder.



K from Grain Size Analysis Report

Date: _____

Sample Name: _____

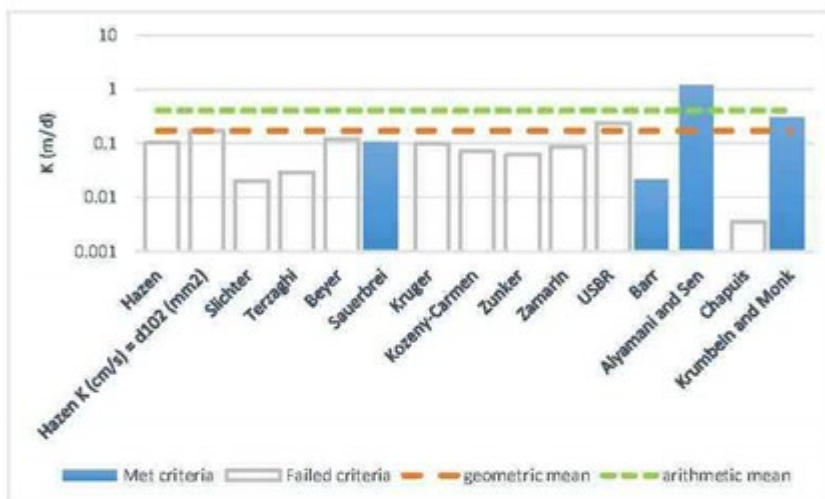
Mass Sample (g):

100

T (°C):

20

Poorly sorted sand with fines



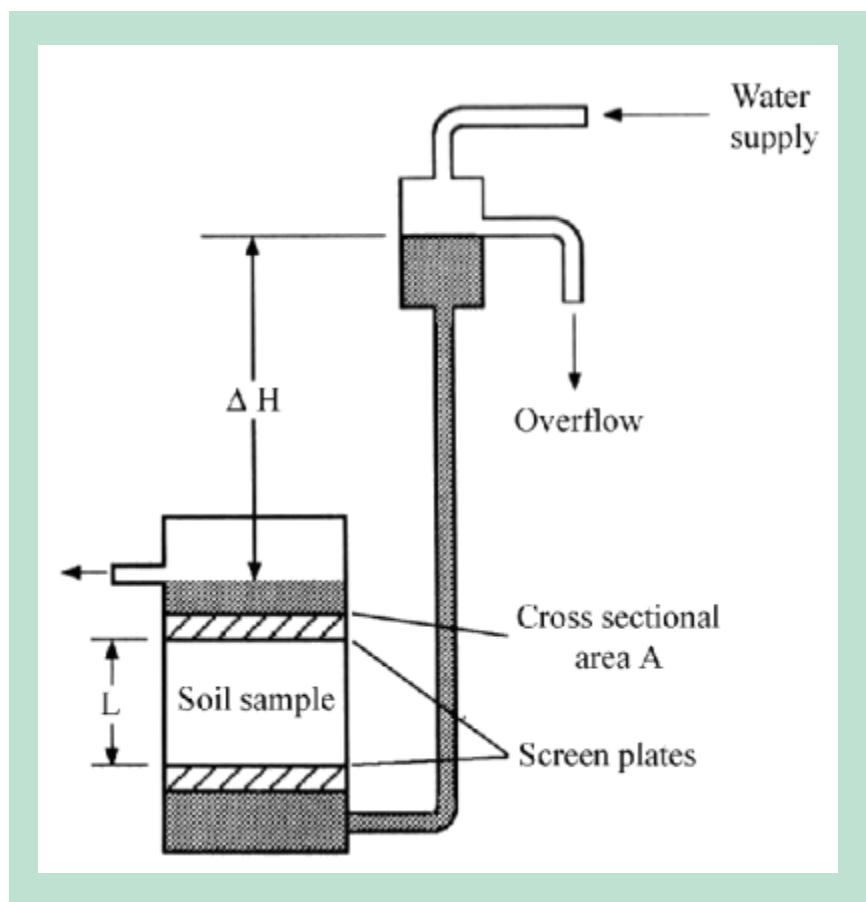
Estimation of Hydraulic Conductivity	cm/s	m/s	m/d	de
Hazen	.116E-03	.116E-05	0.10	
Hazen K (cm/s) = d ₁₀ ² (mm)	.196E-03	.196E-05	0.17	
Slichter	.232E-04	.232E-06	0.02	
Terzaghi	.336E-04	.336E-06	0.03	
Beyer	.138E-03	.138E-05	0.12	
Sauerbrei	.124E-03	.124E-05	0.11	
Kruger	.114E-03	.114E-05	0.10	
Kozeny-Carmen	.817E-04	.817E-06	0.07	
Zunker	.716E-04	.716E-06	0.06	
Zamarin	.100E-03	.100E-05	0.09	
USBR	.274E-03	.274E-05	0.24	
Barr	.250E-04	.250E-06	0.02	
Alyamani and Sen	.136E-02	.136E-04	1.18	
Chapuis	.413E-05	.413E-07	0.00	
Krumbein and Monk	.352E-03	.352E-05	0.30	
geometric mean	.197E-03	.197E-05	0.17	
arithmetic mean	.466E-03	.466E-05	0.40	

FIGUR 7-2. Tolkingsrapport fra HydrogeoSieveXL-regnearket /28/

7.3.2.4 Flowmetertest (permeameter)

Ved en flowmetertest undersøges en intakt jordprøve. Vand ledes igennem en cylindrisk søjle med et konstant eller faldende tryk. Ud fra prøvens geometri og den målte strømningshastighed kan den hydrauliske ledningsevne bestemmes. Prøvematerialet stammer typisk fra en intaktprøve udtaget med f.eks. A-rør eller kerne fra sonic-boring. En væsentlig ulempe ved metoden er, at prøvetagningen fra en boring er besværlig, og at prøvematerialet ofte ikke bliver fastholdt i prøvetageren. Resultaterne fra permeameterforsøg fra borekerner viser prøvens

vertikale hydrauliske ledningsevne, der på grund af småskala-anisotropi oftest er lavere end den horisontale hydrauliske ledningsevne.



FIGUR 7-3. Konstant-tryk flowmeter

7.3.2.5 HPT (Hydraulic Profiling Tool)

HPT er en direct push-teknik, hvor en sonde presses ned i jorden. Med korte ophold presses vand ud gennem en åbning i siden af målesonden med en fast rate. Injektionstrykket for vandet er et indirekte mål for permeabiliteten i jorden. Metoden kombineres ofte med elektrisk modstandsmåling (dipolarrangement) for bedre at kunne karakterisere jorden.

Målingen sker pseudo-kontinuert under nedpresningen, og der opnås derved et detaljeret billede af de relative permeabilitetsforhold i hele dybdeintervallet.

Metoden har en række begrænsninger. Injektionstrykket er kun en indirekte indikation af den hydrauliske ledningsevne og kan ikke direkte omsættes til hydraulisk ledningsevne, ligesom meget permeable og meget impermeable aflejringer ikke kan tolkes. Herudover er det kun muligt at presse proben ned til omkring 25 m under terræn, hvilket gør metoden mindre egnet i tykke sandmagasiner. En særlig udfordring er knyttet til tilstedeværelsen af umættet sand, der kan reducere dybden, der kan presse i betragteligt grundet stor modstand mellem sonde og sand.

7.3.2.6 Borehulslogging

En kvalitativ vurdering af porøsitet og permeabilitet kan fås ved borehulslogging. De mest anvendte loggingmetoder er baseret på logning i åbent hul med boremudder, og er således ikke anvendelige ifm. de fleste borer, der udføres ved miljøundersøgelser. Typiske logtyper til brug i åbne borer er:

- Elektrisk log/naturlig gammalog
- Fokuseret elektrisk log

I forede boringer findes andre logtyper, der er uafhængige af direkte elektrisk kontakt med formationen (jorden), det gælder f.eks.

- **Gammalog:** Ved denne metode analyserer energispektret af gammastrålingen fra naturligt forekommende eller menneskeskabte isotoper i formationen omkring et borehul. Gamma-fotoner produceres overvejende ved henfald af naturligt forekommende kalium, uran og thorium i formationen. De detekteres af en gamma scintillationstæller og konverteres til elektriske impulser. Amplituden af impulserne afhænger af fotonenergien. Typisk indeholder lerede aflejringer et højt indhold af kalium (sidder i lerminerale) og vil derved adskille sig fra sand med lavt indhold af kalium. Imidlertid har glaciofluviale sandaflejringer (smeltevandssand) et højt indhold af uforvitret kalifeldspat og kan derved forveksles med mere lerede aflejringer. Der findes mere avancerede gammalogsonder, hvor energiniveauerne for gammastrålingen kan adskilles, hvorved der kan detekteres imellem kalium, uran og thorium, således at der bedre kan skelnes mellem sand og ler. Disse sonder kan imidlertid ikke anvendes ved kontinuert logning.
- **Neutronlog:** Dual-neutronmåling bruger to ^3He proportionelle detektorer og en aftagelig forseglet ^{241}Am -Be-neutronkilde. Hurtige neutroner, der udsendes af kilden, spredes og formindskes til termiske niveauer hovedsageligt ved hydrogen i formationen. Forholdet mellem neutronfluxen, der når nær- og fjern-detektorerne, afhænger af brintindekset og porøsiteten. Og kan anvendes til at estimere porøsiteten
- **Induktionslog:** Ved denne metode måles den specifikke elektriske ledningsevne af formation (konduktivitet). Måleprincippet er baseret på etablering af et horisontalt strømfelt i jordlagene omkring boringen ved induktion af et vertikalt elektromagnetisk felt omkring målesonden ved hjælp af en senderspole. Dette horisontale strømfelt genererer derefter et sekundært vertikalt magnetfelt, hvis styrke måles i sonden ved hjælp af en modtagerspole. Der er en vis sammenhæng mellem hydraulisk ledningsevne og elektrisk konduktivitet. På grund af udformningen af sonden er den vertikale diskretisering ret dårlig (meter).

7.3.2.7 Ellogboring

Ellogboring er en metode der kan måle direkte på de gennemborede lag under borearbejdet. Den elektriske formationsmodstand måles med elektroder, der er monteret på en hul boresnegl, og gammasonden er monteret inden i denne. Elloggen registrerer de gennemborede lags elektriske modstand med intervaller på få cm. Ellog-metoden er udviklet ved Geofysisk Afdeling og er for nylig blevet revitaliseret, Århus Universitet, /33/.

7.3.2.8 Andre Geofysiske metoder

I forbindelse med et netop afsluttet stort forskningsprojekt "Geocon projektet" er der arbejdet hårdt på at finde metoder til at korrelere data opsamlet med DC-IP geoelektrik fra både overflade og crosshole til hydraulisk ledningsevne. Der forventes en del inden for disse metoder de kommende år /36/.

7.3.2.9 Point Velocity Probe

En måde til at måle strømningshastigheden direkte er anvendelse af den såkaldte PVP (Point Velocity Probe) oprindeligt udviklet af Rick Devlin /37/. Proben er et specialdesignet værktøj, der installeres direkte i jorden. Ved udsending af en tracerpuls kan både strømningsretning og hastighed bestemmes på baggrund af ændringer i den elektriske ledningsevne lige omkring selve proben. Herved fås et direkte mål for strømningshastigheden fremfor at måle hhv. gradient og hydraulisk ledningsevne hver for sig. Udfordringen er at selve proben bliver speciallavet

og derfor pt. ikke er kommerciel tilgængelig. Proben giver ikke mulighed for at den kan udnyttes til vandprøvetagning eller lignende. Proben er primært anvendt relativt nær terræn og ikke i mere mægtige magasiner. Den helt store fordel ved proben er, at man måler kombinationen af både gradient og ledningsevne lokalt, hvilket reducerer en del usikkerhed. Ulempen er at målingen netop er lokal og dermed kun repræsentativ for et mindre volumen. Målingen skal i høj grad vurderes som en punktmåling.

7.3.2.10 Tracerforsøg

En ret omstændig måde at få målt strømningshastigheder på (og samtidig få information om variation) er at udføre et decideret tracerforsøg. Normalt injiceres en ikke-reaktiv tracer (Cl-, Br-, tritieret vand) i et opstrøms punkt (eller flere på tværs af strømningsretningen). Gennembruddet af traceren observeres i flere filtre i nedstrøms retning i forskellig dybde på tværs af strømningsretningen. Ud fra massemidtpunktets gennembrud kan den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne mellem injektionspunktet og observationspunktet beregnes, når gradienten er målt. Formen på gennembrudskurven (bestemmes ved en såkaldt momentanalyse) giver et udtryk for dispersionen. Dispersionen udtrykker to ting, dels den diffusive spredning af stof, der normalt er meget lidt betydende, hvis vandet bare strømmer med en beskeden hastighed, og dels variationen i K værdien langs transektet. Man kan derfor få et indblik i variabiliteten i K værdierne ud over den gennemsnitlige betragtning, når man udfører et tracerforsøg. Tracerforsøg i sandmagasiner er dog relativt sjældne udført og normalt kun i forskningssammenhæng, da det kræver et stort (og dermed dyrt) setup og efterfølgende dataanalyse.

7.3.3 Sammenligning af metoder

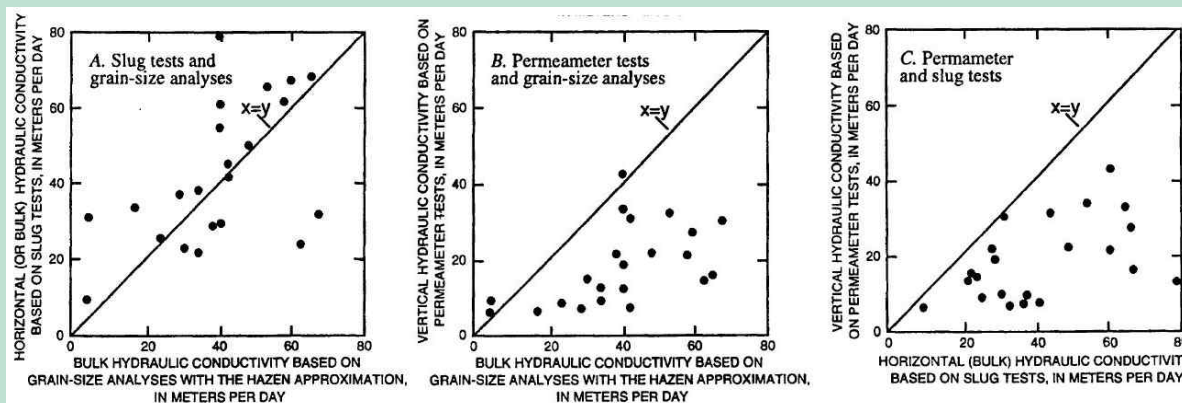
Hvilken metode der er mest anvendelig til at beskrive variationen i en lagpakke bestående af smeltevandsaflejringer af sand og grus skal vurderes i forhold til de nødvendige ressourcer og tidsforbrug ved de enkelte metoder. Ved vurdering af partikelstrømningsveje i tykkere smeltevandsaflejringer er det vigtigt, at variationen af den hydrauliske ledningsevne er kendt over hele lagpakken (fra top til bund), idet en generelt stigende eller faldende hydraulisk ledningsevne kan have stor betydning for partikelbanernes vertikale komponent. Der vil derfor være behov for et større antal enkeltmålinger over hele magasinets vertikale udstrækning. Her kan bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne på basis af kornstørrelsesanalyse være fordelagtig, idet det er en relativt simpel billig metode, der ikke er så omkostningskrævende. Tilsvarende er slugtests i flere filtre placeret over hele den vandmættede del af magasinet en enkel og ikke så omkostningskrævende metode. I medgift her fås tillige blivende pejle og prøvetagningspunkter. Det er dog essentielt, at gruskastningen om filtrene er dimensioneret ift. det omkringliggende sediment for, at slugtestene er repræsentative. I den indledende fase af videregående undersøgelse af forureningsspredningen i tykke sandmagasiner kan ovennævnte metoder derfor anvendes med fordel evt. suppleret med pumpetests i ét eller flere niveauer.

Typisk vil de forskellige metoder give forskellige resultater. Imidlertid vil den overordnede trend for den vertikale variationen af den hydrauliske ledningsevne være den samme (stigende/faldende). Forskellighederne mellem de enkelte metoder afspejler de forskellige forudsætninger og fejlkilder, der er knyttet til metoderne (såsom skalaen af det målte jordvolumen). Generelt vil pumpetests give de mest "sande" resultater i stor skala, mens diskretiseringen i mindre skala vil være bedst ved PVP, permeameter, kornstørrelsesanalyse og slugtests. Da tynde lag, f.eks. ved bunden af sandformationen med høj hydraulisk ledningsevne (bundkonglomerat) vil have en markant indflydelse på strømningsvejene i magasinet vil en kombination af flere metoder ofte være optimal. Det er derfor jf. de indledende afsnit vigtigt, at der er adgang til en boring, der er ført hele vejen igennem det relevante magasin, så hele magasinet kendes.

I litteraturen er der foretaget en lang række sammenligninger mellem de forskellige metoder til bestemmelse af hydraulisk ledningsevne. En række af disse sammenligninger er beskrevet i følgende afsnit.

7.3.3.1 Permeameter, kornstørrelsesanalyse og slugtests

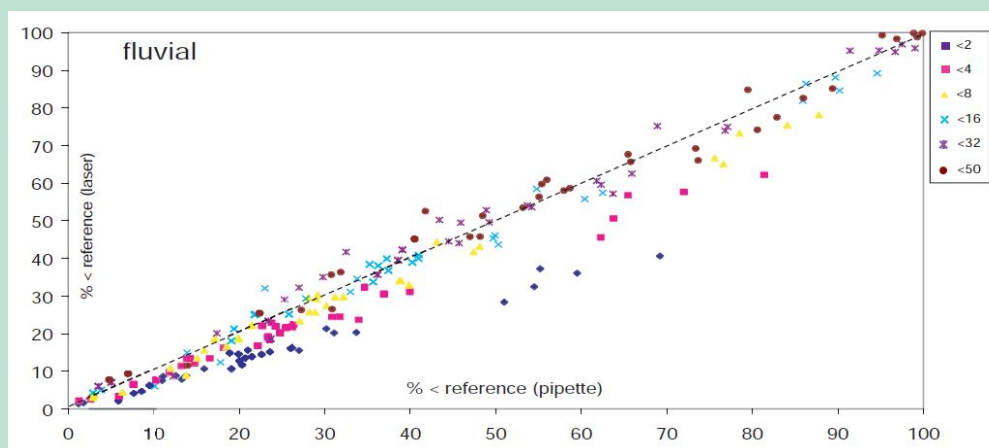
Der er foretaget en sammenligning mellem permeameter, kornstørrelsesanalyse og slugtests ved en række undersøgelser. I /32/ er undersøgt prøvemateriale af sand og grus fra i alt 22 lokaliteter i Massachusetts. Resultatet var, at mens der ikke var afgørende forskelle på resultaterne fra slugtests og kornstørrelsesanalyser var de hydrauliske ledningsevner målt med permeameter generelt lavere. Forskellene tilskrives, at slugtest generelt viser den horisontale hydrauliske ledningsevne, kornstørrelsesanalysen viser "bulk" hydraulisk ledningsevne og permeameter tests måler (i dette tilfælde) den vertikale hydrauliske ledningsevne, dvs. at forskellene overvejende blev tolket til at skyldes småskala anisotropi i magasinet.



FIGUR 7-4. Sammenligning mellem hydrauliske ledningsevne bestemt ved hhv. slugtest, kornstørrelsesanalyse og permeameter, efter /26/

7.3.3.2 Laserdiffraktion/ hydrometerforsøg

I /11/ er der foretaget en sammenligning mellem kornstørrelsesanalyser baseret på hhv. Laserdiffraktion og hydrometerforsøg på tre typer sedimenter (marine, fluviale og løss). Sammenligningen viser en overordentlig stor overensstemmelse mellem de to metoder, dog er resultaterne for kornstørrelser $<50 \mu\text{m}$ lavere for laserdiffraktometri end for hydrometerforsøg. Årsagen til dette tilskrives, at de fineste korn er pladeformede og derfor giver forskellig respons ved de to metoder.



FIGUR 7-5. Forholdet mellem kornstørrelsesfordeling bestemt ved laserdiffraktion og hydrometerforsøg, efter /11/.

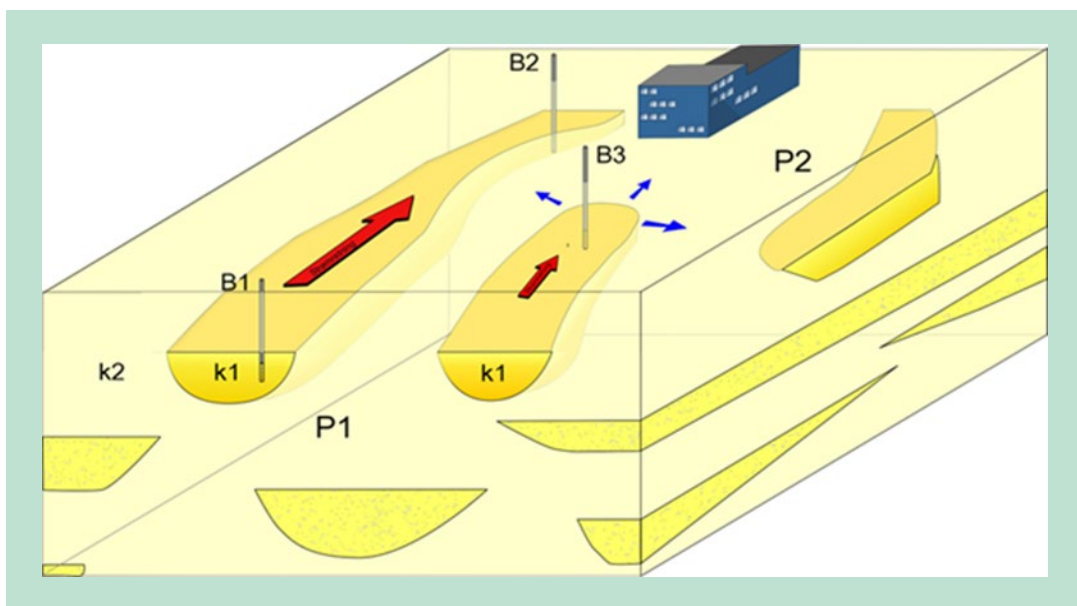
7.4 Horisontal og vertikal gradient

Normalt estimeres den horisontale gradient relativt ukritisk på basis af målte potentialeforskelle i filtre med forskellige afstande, enten ved trekantberegninger eller ved interpolation i forskellige værktøjer, hvis man har mange filtre. Om filtrene præcis har samme vertikale placering eller sidder i præcis samme del af formationen, har samme højde mv. er ofte ikke noget, vi forholder os til systematisk. Dette kan give fejltolkninger, både i forhold til størrelsen og retningen på den horisontale gradient. Den overordnede strømningsretning vil dog som oftest være nogenlunde korrekt. Et par meget banale fejl, der gøres i forbindelse med pejlinger, kan ved omhyggelig tilrettelæggelse og udførsel af feltarbejde undgås og dermed fra start give mere retvisende resultater. Det drejer sig om følgende punkter:

- Man bør sikre, at der er tale om en synkronpejling, dvs. vandspejlsvariationer som funktion af tid bør være belyst inden man udfører synkronpejlerunder. Opstart af pumper, trykændringer eller lignende påvirkning kan give vandspejlsændringer relativt hurtigt, der gør, at strømningsretningen fejltolkes. Ophængning af elektroniske loggere (måler niveauet for vandspejlet løbende) over en periode kan vise disse påvirkninger, så der kan tages højde for variationer ved fastlæggning af gradienter. I meget transientpåvirkede systemer er anvendelse af elektroniske loggere typisk eneste mulighed for at bestemme realtidsgradienter.
- Indmåling af top af filter (pejlepunkt) bør foretages med digitalt nivellement til samme fixpunkt. GPS-indmåling er ofte ikke tilstrækkeligt præcise, hvis gradienten er lille, ligesom nivellement til forskellige fixpunkter i samme nivellement også kan lede til fejlslutninger omkring gradienten.
- Pejling til måling af selve vandspejlet bør i princippet jævnlige kalibreres (og/eller interkalibreres). Hvis ikke dette udføres, bør der som minimum anvendes samme fysiske pejling ved synkronpejlerunder, så det i det mindste er samme systematiske fejl, der sker ved målingen.

Vertikale gradienter er vanskelige at måle i traditionelle filtre, da potentialeforskellene ofte er små, i det der opfattes som et relativt homogent magasin og målemetoden med pejling er relativt grov. Særligt vanskeligt bliver det, hvis filtrene ikke sidder meget nær hinanden horisontalt, så der både er en vertikal og en horisontal gradient mellem filtrene. Som det er beskrevet i modelafsnittet, vil gradienterne være så små, at traditionelle metoder ikke kan detektere gradienterne selv under de forhold, der er til stede ved dykkende faner. Det bedste bud, der er på præcise målinger, er anvendelse af HPT-sonde, hvor det stationære hydrostatiske tryk måles forskellige steder igennem den mættede zone. Som beskrevet tidligere er dette anvendeligt i en række tilfælde, men vil ofte være vanskeligt i stor dybde pga. begrænsninger i nedtrængningsdybden for Geoprobe-systemet generelt.

I nærværende rapport er der fokus på det vertikale aspekt af faners udbredelse. I virkelighedens verden er der også potentielle udfordringer i at bestemme, den præcise strømningsretning og stofudbredelse i det horisontale plan. De mægtige sandlag er opbygget af flettede flodlejer jf. afsnit 5.3. Tæt på isranden har smeltevand typisk haft højere energi i et smallere leje end længere væk, hvor vandet breder sig ud og faldet er mindre. Det betyder, at der er en orientering på både de grovere lag tæt på isfronten og de finere lag længere fra denne. Denne behøver ikke være sammenfaldende med den nuværende strømningsretning. Ligeledes kan senere afsmeltninger have eroderet materiale afsat tidligere. Dette giver muligheden for et relativt kaotisk forløb for "kanaler" i sandet, som illustreret i Figur 7-6. Både i forhold til pejling af den reelle strømningsretning og forløbet af den horisontale vand- og stofudbredelse, kan fordeling, orientering og længde/bredde af kanalstrukturerne sandsynligvis spille en rolle. Dette er dog ikke nærmere belyst i denne rapport.



Figur 7-6 Illustration af kanaldannelse i mægtige sandmagasiner, fra /38/

8. Databehandling

Udover metodevalget ved selve indsamlingen af data og den direkte konvertering/fortolkning mellem en måleparameter som fx afsænkningen som funktion af tiden til en transmissivitet eller ledningsevne, spiller fortolkningen om fordeling af parametrene i rummet efterfølgende også en stor rolle for, hvilke resultater man kommer frem til, når fortolkede værdier bruges i efterfølgende beregninger.

Ofte skal viden om hydrauliske ledningsevner og gradienter omsættes til vandmængder eller stoffluxer for at kunne give en risikovurdering af en given kilde/fane. Det er uhyre sjældent, at man er i besiddelse af et meget tæt netværk af data om ledningsevner og koncentrationer, så en eller anden form for interpolation er oftest påkrævet for at kunne beregne fx den samlede massestrøm gennem et tværsnit.

Databehandlingen, der indgår og vores konceptuelle opfattelse af forholdene, har en effekt på hvilke resultater, man kommer frem til. Emnet i sig selv er stort og voldsomt, så beskrivelserne er tænkt som en "appetitvækker" til selv at arbejde videre i forhold til dette, og samtidig give et indtryk af påvirkning af resultaterne ved selve databehandlingen, og dermed også de usikkerheder, der er knyttet til dette.

Oftest vil vores data om koncentrationer og hydrauliske ledningsevner/gradienter være knyttet til punkter i en rumlig fordeling. Gradienter måles typisk over større afstande og integrerer dermed en værdi over en længdeskala. Tilsvarende overvejelser kan selvfølgelig gøres ift. ledningsevner indsamlet ved pumpeforsøg jf. tidligere afsnit.

Punktdata som hydraulisk ledningsevne i et plan/volumen beskrives oftest med en form for geostatistik, dvs. en fordeling hvor der indgår en middelværdi, en spredning/varians på værdien og en korrelationslængde og retning. Korrelationslængden udtrykker, at der er en sammenhæng mellem data målt i to punkter inden for korrelationslængden. Når et sediment har en struktur, vil der ofte også være en retning knyttet til, fx antages korrelationslængden i det vertikale plan oftest at være meget kort pga. den småskalavariation, der er beskrevet i tidligere kapitler. Et berømt datasæt af ledningsevner blev samlet af Sudicky tilbage i 1986 /34/ i Borden i Canada, hvor han samlede punktpøver ved permeameteret med 5 cm opløsning i det vertikale plan og 1 m i hhv. strømningsretningen og på tværs af denne; i alt 720 prøver blev analyseret. I dette sediment var der horisontal isotropi og en korrelationslængde i det horisontale plan på 2,8 m og i det vertikale plan på 0,12 m. Ledningsevnerne i sandet kunne beskrives med en logaritmisk normalfordeling hvor $\ln K$ (m/s) var fordelt $N(-4,63, 0,38)$, svarende til at 95% af de målte K værdier lå indenfor intervallet $2,8 \cdot 10^{-3}$ til $3,4 \cdot 10^{-2}$ m/s, hvilket er et meget groft sediment. Forskellen mellem højeste og laveste 95% niveau svarer til en faktor 12.

Poul Bjerg et al. /36/ udførte tilsvarende målinger med slugtest i et sandmagasin ved Vejen, hvor der var også en log normalfordeling af værdierne af ledningsevnen. Her lå 95% af værdierne i intervallet i intervallet $1,5 \cdot 10^{-5}$ til $1,7 \cdot 10^{-4}$ m/s, igen svarende til ca. en faktor 12 mellem højeste og laveste værdier. Korrelationslængden horisontalt var lille (1-2,5 m) i de tre lag, der blev vurderet.

Begge disse undersøgelser er udført i sedimenter, der har ligget relativt langt fra israndslinjen og har dermed en forholdsvis ensartet struktur.

I tre eksempler der tidligere er beskrevet (Kærhøjgårdsvej Vassingerød, Kongevejen 158 Birkerød og Ravnsbjergvej 1 Veksø) er de indsamlede data testet i en log normalfordeling. Der er

ikke udført en egentlig geostatistisk analyse, da data ikke er samlet med tilstrækkelig tæthed til, at det giver mening. Data er vist i TABEL 8. På Ravnsbjergvej blev der udover slugtestene udført en egentlig pumpetest på et filter i det dybe højpermeable materiale. Denne gav en T værdi ca. 10 gange større end det, der kunne estimeres på baggrund af den vertikale fordeling af K værdierne fra slugtestene.

TABEL 8. Oversigt over fordeling af data på tre udvalgte lokaliteter. Middelværdi og konfidensintervallet er angivet på basis af en lognormalfordeling. K er i enheden m/s og T i m²/s. Faktor 95 er forholdet mellem øvre og nedre værdi i 95% intervallet, Range er maksimum delt med minimum i datasættet

Datasæt	Parameter	Antal	Middel-værdi	95 % nedre	95 % øvre	Faktor 95 interval	Total range
Kærhøj-gårdsvej - sigteprøver	K	28	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	5,8	91
Kærhøj-gårdsvej - slugtest	K	9	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,8	2,6
Kærhøj-gårdsvej - pumpetest	T	7	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	3,7	7,0
Kærhøj-gårdsvej - pumpetest	Afledt K*	7	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1,5	1,8
Kærhøj-gårdsvej - pumpetest	Afledt K**	7	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	3,7	7,0
Kongevej 158 - slugtest	K	45	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	64	127
Ravnsbjergvej - slugtest	K	5	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	18	4,2

K* er bestemt som T/filterlængden

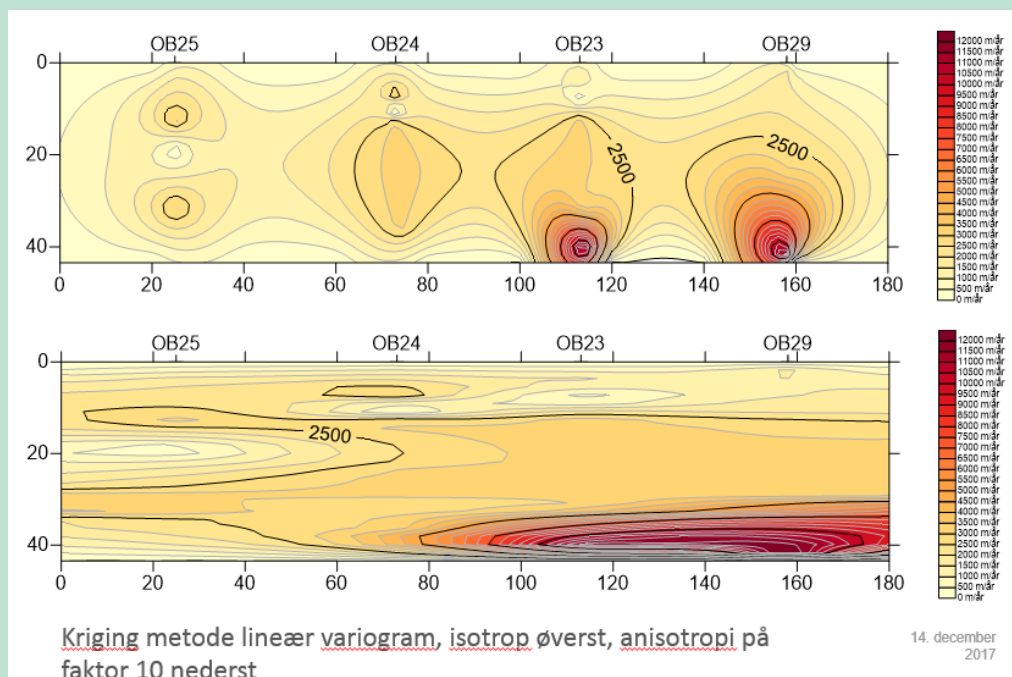
K** er bestemt som T/hele højden af magasinet (antaget til 40 m)

Som det fremgår af tabellen, er der ca. en størrelsesordens forskel på K værdierne bestemt ved beregning af K ud fra kornstørrelserne og slugtest på Kærhøjgårdsvej, hvor slugtest værdierne er lavest. Variabiliteten af K er størst i kornstørrelsesfordelingen, hvilket er forventeligt, da K værdierne ved slugtest integrerer over filterhøjden. Der ses generelt en begrænset variationsbredde i data fra denne lokalitet sammenlignet med både data fra Borden og Vejen samt de to andre eksempler som er beskrevet i denne rapport.

På Kongevejen ses en stor variation i fordelingen af K værdier målt ved slugtest med mere end 2 størrelsesordener mellem højeste og laveste værdier, hvilket er det højeste observeret i denne rapport, og sammenligneligt med det, der observeres på Kærhøjgårdsvej i sigteanalyserne.

På Ravnsbjergvej er variationsbredden i de direkte målinger begrænset, men pga. af det begrænsede antal data ses en større spredning på 95% konfidensintervallet. Som beskrevet tidligere viste en pumpetest senere væsentligt højere værdier, og det mistænkes at gruskastningen af filtrene har haft en negativ indflydelse på bestemmelse af K værdien ved slugtesten. Dette kunne også observeres ved prøvepumpningen som en meget lav effektivitet i pumpeboingen.

Interpolationsmetodikken, der anvendes når fx en gennemsnitlig ledningsevne eller flux/massestrøm skal fastlægges, har også en betydning for de resultater, der beregnes. På Figur 8-1 er vist den interpolerede hydrauliske ledningsevne ved simpel kriging (lineært variogram) under antagelse om hhv. ingen anisotropi (øverst) og en anisotropifaktor på 10 (korrelationslængden 10 gange større horisontalt end vertikalt) for data, der stammer fra et transekt på tværs af stømningsretningen på Ravnsbjergvej. Ved antagelsen om isotropi er den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne ca. $6 \cdot 10^{-5}$ m/s og ved antagelsen om anisotropi ca. $1 \cdot 10^{-4}$ m/s svarende til en vandmængde på hhv. 8.900-14.500 m³/år.



Figur 8-1 Betydning af forskellige interpolationsrutiner. Bemærk at krigede overflader er gennemsnittet i ethvert punkt og derfor et udfald, der har en relativt begrænset sandsynlighed.

Den tilsvarende øvelse er gjort på koncentrationsdata. Ganges koncentrationsdata med hydraulisk ledningsevne og gradient får man et udtryk for fluxen, der kan integreres over hele arealet til den samlede massestrøm. På Ravnsbjergvej betød forskellen mellem metoderne en forskel på de beregnede massestrømme omkring en faktor 3 (1,9-5,8 kg/år).

Andre interpolationsrutiner vil give andre resultater. En egentlig geostatistisk analyse af data vil ofte være fordelagtig, da man kan få et indblik i, både hvor i rummet ens analyse har stor usikkerhed, og herudover kan få kvantitative estimater på usikkerhederne. Databehandlingen kræver dog ofte specialsoftware, ligesom fortolkningen og valg af fordelinger mm. i analysen ikke altid er indlysende og typisk kræver et stort indblik i både metoderne og de indgående datas egen usikkerhed og struktur.

Det er således også et punkt, der skal have bevågenhed, når man omsætter sine målte data til hastigheder, fluxe etc.

9. Konklusioner og anbefalinger

Sammenfattende konkluderes det, at der i en lang række tilfælde vil kunne konstateres faner der dykker væsentligt mere, end hvad man umiddelbart ville forvente, når forurening spredes i mægtige sandmagasiner. Dette er dokumenteret i en række eksempler, der kort er præsenteret i afsnit 5.2. Den overordnede risiko ved ikke at opdage en dykkende fane er, at man overser risikoen knyttet til en forurening, enten fordi en manglede eller lav koncentration tæt på toppen af grundvandsmagasinet tolkes som at der ikke er nogen forurening, at der er sket en nedbrydning, eller tolkes som forurening, hvor fanen bare ikke er kommet længere.

Ud fra forskellige hypoteser om, hvad der kan betinge spredningen til stor dybde, er disse afprøvet i en syntetisk strømningsmodel. En række konklusioner kan drages både fra de faktuelle observationer i de beskrevne eksempler og den udførte modellering. Faktorer, der betinger at en forureningsfane (som opløst stof) dykker, er primært styret af følgende:

- Placering af kilden til forureningen i forhold til vandskellet i magasinet. Tæt på vandskellet dykker fanen mest. Jo længere fra vandskellet jo mindre dykker fanen helt overordnet.
- Tilstedeværelsen af høj permeable lag dybt i magasinet. Jo større kontrast, der er i den hydrauliske ledningsevne desto mere udpræget er effekten. Geologisk set træffes dette fænomen oftest ved de såkaldte "fining-upwards" aflejrede sedimenter. Særligt udpræget kan de højpermeable lag forekomme, hvor man har et groft bundkonglomerat aflejret i bunden af sandsekvensen.
- Tilstedeværelse af barrierer (lavpermeable lag) i den mættede del af lagfølgen, der enten afsnører dele af strømningsarealet rent fysisk eller som optræder som en reduktion i ledningsevnen i de højpermeable zoner.

En række andre parametre som fx den lokale infiltration, forholdet mellem vertikal og horisontal ledningsevne, mægtigheden af magasinet ved udløb i havet, længden af magasinet, oppumpning i magasinet langt fra kilden spiller alle kun enten mindre roller eller ingen rolle for den lokale spredning nær kildeområderne. Oppumpning tæt på kilden kan have en betydelig effekt på forureningstransporten og dermed udbredelsen og herunder dykning af en forureningsfane.

Konklusionerne kalder derfor på, at man som et led i sin undersøgelsesstrategi starter med at "zoome" ud i langt større skala end kun den forurenede ejendom. Man bør foretage vurderinger med baggrund i oplandsskala, hvis man har en forventning om, at forureningen kan spredes og evt. dykke via et større sandmagasin. Information, som det vurderes at der skal søges, er i første omgang:

- Placering af kilden i oplandet ud fra regionalt potentialekort for sandmagasinet. Hvis ikke det eksisterer, må man på baggrund af fx data fra Jupiter se, om man kan få så meget information, at det er muligt at vurdere placeringen.
- Boreprofiler i Jupiter mm. der helst skal gå gennem hele sandlaget. Fra gode boreprofiler kan man få beskrivelser af de observerede kornstørrelser igennem profilet. Det er her særligt vigtigt at se, om der forekommer et meget groft bundkonglomerat.
- Overordnede geologiske beskrivelser for områdets genese, i det omfang de eksisterer. Hvor har isen evt. stået?, kendes afstrømningsretninger mv.? Er det forventning, at magasinet er meget inhomogent på denne baggrund osv.?

- Tilstedeværelsen af barrierer i sekvensen på en skala fra ud til ca. 1500 m fra kilden. Dette kan være kystskrænter, tunneldale mm. i landskabet, hvor sandmagasinet enten helt eller delvis afsnøres af fx moræneaflejringer fra en senere istidshændelse. Et rigtig godt værktøj til at se denne slags ændringer i landskabet er SCALGO, hvor højdedata visualiseres på en meget informativ måde. Andre afsnøringer af højpermeable zoner kan være vanskelig at lokalisere fra kortmateriale, men kan i en række tilfælde aflæses ud fra poreprofiler og evt. geologiske modeller udarbejdet for området.

Ud over disse informationer kan ofte få viden om homogenitet og fining sekvenser i umættet zone i evt. grusgrave i nærheden af kildeejendommen.

Hvis en eller flere af de beskrevne forhold indikerer, at der er en reel mulighed for, at forureningsfanen dykker, bør man have dette med inde i sine overvejelser, når undersøgelsen planlægges. Der bør i et sådan tilfælde som minimum udføres mindst én boring til bunden af sandlaget nedstrøms kildeområdet. Boringen bør udføres med en teknik, der giver mulighed for at udtage prøver til karakterisering af sedimentets kornstørrelsesfordeling, ligesom måling af PID i felten på det opborede materiale kan være med til at indikere, hvor en forureningsfane er placeret i det vertikale plan. Der kan endvidere med fordel eventuel etableres midlertidige filtre for vandprøvetagning, pejling og eventuelt gennemførelse af slugtests. Metoder som MIP-HPT er også meget velegnede til beskrivelse af disse fænomener, men vil ofte løbe ind i den generelle udfordring med at gennembyrde evt. større tørre sandlag over den mættede zone og herudover nå til tilstrækkelig dybde, idet der i mange tilfælde skal bores til 40-60 m under terræn (og i visse tilfælde endnu dybere). Der kan endvidere ikke udtages vandprøver ved MIP-HPT.

Til at vurdere tilstedeværelsen af højpermeable zoner og identificere placeringen af disse er det nødvendigt at kende den vertikale fordeling af den hydrauliske ledningsevne. Der findes en række værktøjer til bestemmelsen af fordelingen. En enkel og billig måde er udtagning af prøver under borearbejdet, hvorpå der udføres analyser af kornstørrelsen. Fordeling kan anvendes til estimering af ledningsevnen, så man relativt enkelt kan få et mål ned igennem profilet. En anden meget anvendt metode er udførsel af slugtest i filtre. Disse integrerer værdien over filterlængden og kan herudover være fejlbehæftet (typisk måles for lave værdier), hvis boringen har såkaldt skin effekt, hvis afprovningsmateriale er trængt ind i gruskastningen, eller der er anvendt en gruskastning, der har for fin kornstørrelse. Luksus-modellen til bestemmelse af fordelingen af ledningsevne i lidt større skala er udførsel af pumpetest i forskellig dybde, med observation af sænkning i forskellig afstand og dybde. Her fås mål for transmissivitet (ledningsevnen integreret over højden af strømmingen) i et større volumen. En kombination af de forskellige metoder (kornstørrelsesanalyser, slugtests, og pumpetest etc.) vurderes at give den bedste fælles information. Der vil dog under alle omstændigheder være usikkerheder knyttet til både tolkningen af data og udførsel af de enkelte test, så helt præcise estimater er vanskelige at opnå, dog vil det give et godt billede af de lokale muligheder for nedtrængning af forurening til større dybder i magasinet. Generelt må man forvente at transmissivitet og K kan bestemmes indenfor ca. 1/2 størrelsesorden.

Til bestemmelse af strømningshastigheden skal man også kende gradienten (og retningen). Normalt regnes dette for en relativt banal opgave at bestemme, men eksempelvis den vertikale komponent er i praksis meget vanskelig at få målt. HPT målinger af det hydrostatiske vandspejl er formentlig den bedste metode, hvis man har behov for at måle den vertikale gradient, da almindelig pejling ikke er præcist nok, hvis magasinet kun er mildt heterogent ($K_v \geq 1/10 \cdot K_h$). Ift. den horisontale komponent er det vigtigt, at pejlepunkter er digitalt nivelleret, sidder i samme del af formationen, og at pejlingen foretages synkront med samme fysiske pejl (eller interkalibrerede pejl så evt. afvigelser kendes).

Den indsamlede viden om hydrauliske ledningsevner, gradienter og koncentrationer i fane skal ofte bruges til en risikovurdering af forureningen, særligt med henblik på at kunne estimere

massestrømme ud af fanen. I praksis har man i sin undersøgelse normalt et antal punkter, hvori der er målt hydraulisk ledningsevne og et tilsvarende hvori, der er målt koncentrationer. En del af disse punkter vil ofte være sammenfaldende. Som det er beskrevet tidligere, er der ved de relativt få undersøgelser, der er udført geostatistisk af fordelingen af ledningsevne i magasiner, fundet relativt korte korrelationslængder for værdierne af K. Typisk er det få meter i X, Y akser og på cm skala i Z akser. Så højeopløste data forekommer stort set kun i forskningsundersøgelser, men den generelle viden kan anvendes ifbm. interpolation i transekter. Mange interpolationsrutiner (standard kriging, inverse distance mfl.) anvender ikke retningsorientering, når der interpoleres, hvilket betyder at data i de tre planer interpoleres med lige stor vægt. En mere retvisende interpolationsmetode vil være at anvende en anisotropi faktor, der tillægger data i X, Y akser 10-100 gange større værdi end i det vertikale plan, når der interpoleres. Som det er illustreret i afsnit 8 kan det betyde op til omkring en $\frac{1}{2}$ størrelsesorden for beregning af flux/massestrøm, hvilken interpolationsmetode der bruges. Med de samlede usikkerheder på de indgående parametre giver det dermed formentlig en samlet usikkerhed omkring 1 størrelsesorden på en flux/massestrømsberegning, hvis datadækningen er tilstrækkelig tæt.

10. Litteraturliste

1. Stig A. Schack Pedersen: Glaciodynamic sequence stratigraphy, Geological Society, London, Special Publications, 368, 29-51, 10 April 2012.
2. Målinger fra iskernerne fra NordGRIP og NEEM. National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.noaa.gov/> USA.
3. Michael Houmark-Nielsen i Developments in Quaternary Sciences: Chapter 5 Pleistocene Glaciations in Denmark: A Closer Look at Chronology, Ice Dynamics and Landforms, 2011.
4. Erik Maagaard Jacobsen, En råstofgeologisk kortlægning omkring Roskilde, Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1984, side 65-78, København, 28. februar 1985.
5. Stig A. Schack Pedersen, Leif Aabo Rasmussen og Johnny Fredericia: Kortbladsbeskrivelse til Geologisk kort over Danmark, 1:50 000, Sakskøbing 1411 I og 1412 II Syd, Geol. Surv. Den. Green. Map Series 6, 42 pp. 2015
6. Stig Asbjørn Schack Pedersen: Strukturgeologisk analyse af Rubjerg Knude glacialtektoniske Kompleks, Lønstrup Klint, Vendsyssel, Danmark, Særudgivelse Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, GEUS, København, 2006
7. Robert L. Burger og Kenneth Belitz : Measurement of anisotropic hydraulic conductivity in unconsolidated sands: A case study from a shoreface deposit, Oyster, Virginia, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 33, NO. 6, PAGES 1515-1522, JUNE 1997.
8. S. Assouline og D.Or: Anisotropy factor of saturated and unsaturated soils. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 42, NO. 6, 2006.
9. Douglas Carlson: Estimate of Vertical Anisotropy of Hydraulic Conductivity for Northern Louisiana Aquifers from Grain-Size Data, Proceedings of Baton Rouge Geological Society's 1st Annual Louisiana Groundwater Symposium, Baton Rouge, Louisiana, 2007.
10. N. McCave, R. J. Bryant, H. F. Cook, C. A. Coughanowr: Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. Journal of Sedimentary Research ; 56 (4): 561-564, 1986.
11. P. Buurman, Th. Pape, J. A. Reijneveld, F. de Jong and E. van Gelder: Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial, and loess samples, Geologie en Mijnbouw / Netherlands Journal of Geosciences 80 (2): 49-57, 2001
12. Hantush, M.S.: Drawdown around a partially penetrating well, Jour. of the Hyd. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng., vol. 87, no. HY4, pp. 83-98, 1961a.
13. Hantush, M.S.: Aquifer tests on partially penetrating wells, Jour. of the Hyd. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng., vol. 87, no. HY5, pp. 171-194., 1961b.
14. Theis, C.V.: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geophys. Union Trans., vol. 16, pp. 519-524., 1935.
15. Hazen, A.: Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use infiltration. Massachusetts State Board of Health, vol. 24th annual report, pp. 539-556, 1892.
16. Slichter, C.S.: Theoretical investigations of the motion of ground waters: United States Geological Survey, 19th Annual Report, p 295-384, 1898
17. Terzaghi, K: Principles of soil mechanics: Engineering News-Record, v. 95, p 832, 1925.
18. Beyer, W. : "Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve." Wasserwirtschaft-Wassertechnik 14(6): 165-168, 1964.
19. Sauerbrey I. I.: Über den Koeffizienten der Bodenfiltration und die Methodik seiner Forschung, Proceedings VNIIG 3, 5., 1932.
20. Krüger, E.: Die Grundwasserbewegung (Groundwater flow). Int. Mitt. Bodenk. 8, 105-122, 1919.

21. Kozeny, J. (1953). Das Wasser im Boden. Grundwasserbewegung. Hydraulik, Springer, p 380-445, 1953
22. Zunker, F.: Das Verhalten des Wassers zum Boden . Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde. A25(1): 7, 1930.
23. Zamarin, J.A.: Calculation of ground-water flow (Russisk). Trudey I.V.H. Taskeni, 1928.
24. Barr, D.W.: Coefficient of permeability determined by measurable parameters. Ground Water, v. 39, no. 3, 356-361, 2001.
25. Alyamani, M.S., Sen Z.: Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. Ground Water, v. 31, no. 4, 551-555, 1993.
26. Chapuis, R.P.: Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Canadian Geotechnical Journal, v. 41, 787-795, 2004.
27. Krumbein, W.C., Monk, G.D.: Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Transactions v. 151, 153-163, 1942.
28. J.F Devlin Software: <http://www.people.ku.edu/~jfddevlin/Software.html#Gradient>
29. L. Brown, David & N. Narasimhan, T & Demir, Zafer: An Evaluation of the Bouwer and Rice Method of Slug Test Analysis. Water Resources Research - WATER RESOUR RES. 31, 1995
30. Michael D. Campbell, Mary Sneed Starrett, Jack D. Fowler, and J. Jay Klein: Slug Tests and Hydraulic Conductivity i Proceedings of Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration, Ground Water Management nr. 4, 1990
31. Thomas Vienken, Peter Dietrich: Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data, Journal of Hydrology, 58-71, 2011
32. Linda P. Warren, Peter E. Church og Michael Turtora: Comparison of Hydraulic Conductivities for a Sand and Gravel Aquifer in Southeastern Massachusetts, Estimated by Three Methods U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4160, 1995
33. Sørensen, K., 1989: A method for measurement of the electrical formation resistivity while auger drilling. First break 7, pp. 403-407
34. Sudicky, E., 1986: A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: Spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process. Water Ressources Research, 22, pp. 2069-2082.
35. Bjerg, P. L., Hinsby, K., Christensen, T.H., Gravesen, 1992: Spatial variability of hydraulic conductivity of an unconfined sandy aquifer determined by a mini slug test. Journal of Hydrology, 136, pp. 107-122.
36. Maurya, P.K., Balbarini, N., Møller, I., Rønde, V., Christiansen, A.V., Bjerg, P.L., Auken, E., Fiandaca, G., 2018: Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization. Geophysical Journal International, 213, pp. 770-785.
37. Gibson, B., Devlin, J.F., 2017: Laboratory validation of a point velocity probe for measuring horizontal flow from any direction. Journal of Hydrology, 208, pp. 10-16.
EF-tidende L327 af 22/12/2000. Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2000/60/EF af 23. oktober 2000 om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger.
38. Larsen, L., Johansen, P., 2015: Tracing an extensive MTBE plume in a sandy aquifer trying to escape monitoring wells using thorough hydrogeological site understanding. Poster presented at Aquaconsol June 9-12, Copenhagen, Denmark.

Ny konceptuel forståelse af forureningstransport i regionale sandmagasiner - Optimering af undersøgelsesstrategier og metoder

Rapporten omhandler transport af forurening i større grundvandsmagasiner opbygget af sand. Der har været fokus på forureningsspredningen tæt på kilderne, med fokus på om forureningsfanerne dykker. Undersøgelsen viser, at placeringen af forureningskilden ift. vandskel spiller en stor rolle for, om forureningen dykker i magasinet. Grovere lag i undergrunden spiller ligeledes en betydende rolle for, hvorvidt en forureningsfane dykker. En faktor, der ligeledes har stor betydning, er en pludselig reduktion i transmissiviteten i sedimentet fx ved tilstedeværelse af ler. Regional oppumpning spiller derimod kun en lille rolle for den lokale udbredelse.

Undersøgelsen er bl.a. baseret på simulering af en række forskellige scenarier i en matematisk strømningsmodel. Scenarierne er opstillet på baggrund af observationer fra en række eksempler fra feltundersøgelser, hvor forureningsfaner, der dykker mere end forventet, er observeret. Udover de nævnte forhold blev en række andre teser prøvet af i de syntetiske strømningsmodeller. De fleste ændringer gav ingen eller kun lille effekt på forureningsfanens form.

I rapporten er der også redegjort for forskellige metoder til fastlæggelse af de hydrauliske parametre i sandmagasiner.

Samlet peger rapportens konklusioner på, at man skal zoome ud, når man tilrettelægger en forureningsundersøgelse i et mægtigt sandmagasin og ikke kun fokusere indsatsen helt lokalt. Dette betyder, at det er vigtigt at vurdere det overordnede strømningsregime, dvs. hvor forureningskilden befinder sig ift. dette. Herudover er det vigtigt at vurdere om der findes dybe højpermeable lag eller barrierer indenfor 1500 m afstand fra kilden. Hvis disse forhold er tilstede, er udførsel af dybe (og dermed dybe borer) meget nødvendige.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk