Modellering af skalaafhængig stoftransport i opsprækket kalk







AALBORG HANNERSITET - VAND & MILLO JAFGANGERROJEKT - JUNE 2012

Aalborg Universitet Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet School of Engineering and Science Sohngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg Telefon: 9940 8530 http://www.bsn.aau.dk

Titel: Modellering af skalaafhængig stoftransport i opsprækket kalk - Grundvandsbeskyttelse mod nitratforurening i Drastrup Tema: Strømninger og stoftransport i opsprækket kalk Projektperiode: 1. sept. 2011 - 8. jun. 2012, 3. - 4. semester Projektgruppe: B206a Forfattere:

Christian Winde Pedersen

Merete Dons Hørlück

Vejledere:

Jacob Birk Jensen, NIRAS A/S Per Møldrup, Aalborg Universitet

Oplagstal: 5 Sidetal: 148 Bilagsantal og art: 7 appendiks og CD-ROM Afsluttet: 08-06-2012

Rapportens indhold må offentliggøres (med kilder) efter aftale med forfatterne.

Synopsis:

Afgangsprojektet omhandler en analyse af de hydrogeologiske og stoftransport parametre, som er bestemmende for, hvorledes strømninger og stoftransport forekommer i opsprækket kalk. Analysen tager udgangspunkt i en foretaget grundvandsbeskyttelse for nitrat af Aalborg Forsyning, Vand A/S' kildeplads i Drastrup, hvor der nu, et årti efter den foretagede beskyttelse, stadig ikke ses en effekt på kvaliteten af det indvundne vand. Til udførelsen af analysen foretages tre forsøg, strømningsforsøg på lille, mellem og stor skala og stoftransportforsøg på mellem og stor skala.

Ved strømningsforsøget på lille skala bestemmes en middel hydraulisk ledningsevne til $5.2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ og en middel total porøsitet til $0.44 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ for seks intakt kalkprøver.

Ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala findes en hydraulisk ledningsevne til $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, en effektiv porøsitet til $0,03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ og at dispersionen er lille. På baggrund af målte gennembrudskurver for klorid findes det, at kloriden tilbageholdes med op til en faktor 11 i forhold til vandets transporttid, forårsaget af udvekslingen mellem sprækker og matrice. Ved modellering med tre forsimplede metoder af målte gennembrudskurver findes det, at ingen af metoderne beskriver transporten tilstrækkelig korrekt til at kunne eftervise kurverne fuldstændigt. Det vurderes, at en numerisk sorptionsmodel er den mest anvendelige.

Ved strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala bestemmes via modellering af gennembrudskurver en hydraulisk ledningsevne til $1,1\cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ og en effektiv porøsitet til 0,014 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Med dette udgangspunkt opsættes en 3D grundvandsmodel for Drastrup, hvorudfra det vurderes, at grundvandsbeskyttelsen vil bevirke, at nitratkoncentrationen i magasinet vil være under grænseværdien om 100 - 200 år fra 1994.

Forord

Dette projekt, *Modellering af skalaafhængig stoftransport i opsprækket kalk - Grundvandsbeskyttelse mod nitratforurening i Drastrup*, er et langt afgangsprojekt (60 ECTS) af Christian Winde Pedersen og Merete Dons Hørlück, kandidatstuderende ved *Vand og Miljø*, School of Engineering and Science, Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet. Projektet omhandler bestemmelse af hydrogeologiske og stoftransport parametre i kalk. Projektet tager udgangspunkt i en nitratforurening af Aalborg Forsyning, Vand A/S' kildeplads i Drastrup. Projektet er udarbejdet i perioden fra 1. september 2011 til 8. juni 2012.

Ved projektets opstart blev der opstillet fire læringsmål for projektet:

- Viden om drikkevandsinteresser.
- Analyse af de hydrogeologiske og stoftransport egenskaber i opsprækket kalk.
- Anvendelse af modeller til simulering af strømninger og stoftransport i opsprækket kalk.
- Vurdering af risiko for forurening af grundvandet i Drastrup.

Projektet er udført i samarbejde med NIRAS A/S, Aalborg. NIRAS A/S har været behjælpelige finansielt ved køb og leje af udstyr i forbindelse med udførelse af forsøg. Ligeledes har NIRAS A/S hjulpet med den formelle kontakt til myndighederne.

Projektgruppen vil gerne rette en tak til Thomas Jensen, drift ansvarlig for dankalk Mjels (Mjels Kalkbrud), som har været til stor hjælp ved udtagelse af intakte kalkprøver. Ydermere rettes en tak til laboratorieansatte tilknyttet Aalborg Universitet, særligt Niels Drustrup og Helle Blendstrup.

Læsevejledning

I forbindelse med projektet er der blevet udarbejdet en hovedrapport med tilhørende appendiks, samt en bilags CD-ROM. Hovedrapporten omhandler en præsentation af projektlokaliteten, Drastrup, samt problemstillingen på lokaliteten. På baggrund af problemstillingen udføres en skalaafhængig parameterbestemmelse for vand- og stoftransport i kalk. Dette resulterer i en vurdering af den fremtidige nitratpåvirkning i Drastrup.

Appendiks indeholder materiale relateret til hovedrapporten, eksempelvis beskrivelse af udtagelsen af prøver til forsøg. Referencer til appendiks er gjort med et blokbogstav, eksempelvis appendiks B.

Elektronisk bilag fremgår af listen med elektroniske bilag efter indholdsfortegnelsen til hovedrapporten. Elektroniske bilag er vedlagt på en CD-ROM bagerst i rapporten og er primært bestående af beregningsfiler, samt anden data som kan forekomme relevant. Referencer til elektronisk bilag er gjort med et E (elektronisk) efterfulgt af kapitel nummer, samt bilagsnummer. Eksempelvis vil bilag 3 i kapitel 4 benævnes bilag E.4.3.

Symbolforklaringer fremgår af symbollisten, der findes på side IX. Ydermere fremgår forkortelser af akronymlisten, som løbende benyttes i rapporten.

Figurer, tabeller og ligninger er nummereret efter det respektive kapitel. Eksempelvis er den første figur i kapitel tre nummereret 3.1, anden figur 3.2 og så fremledes. Figurer og tabeller er tildelt en figur- eller tabeltekst. Er figuren ikke udført af projektgruppen indeholder figur- eller tabelteksten en kilde. Hvis figuren eller tabellen er redigeret fremgår dette af kilde, eksempelvis (Jensen, 2012, Redigeret).

Referencer og litteraturlisten er opbygget ved brug af Harvard metoden.

Alle boringer navngives ved DGU nr. Vandværkets kaldenavne fremgår i appendiks A. Bagerst i appendiks findes et kort med de mest relevante boringer nær Drastrup kildepladserne. Kortet kan foldes ud, således læseren lettere kan bevare overblikket.

Symbolliste

Α Tværsnitsareal [L²] Afstrømning $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ A_S Magasindybde [L] b $\frac{M}{L^3}$ С Koncentration Tiden, som går fra slutning af injektionen af tracer til halvdelen d af massen af traceren er genfundet [T] D Dispersion-diffusionskoefficient, en samlet koefficient, der dækker over både diffusion og dispersion $(D = D_{eff} + D_h) \left| \frac{L^2}{T} \right|$ Diffusionskoefficient for stof i vand (for klorid 2,03 $\cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$) $\left[\frac{L^2}{T}\right]$ $D_{0,l}$ Den effektive diffusionskoefficient $\left(D_{eff} = \frac{D_{p,l}}{\theta_{im}}\right) \left[\frac{L^2}{T}\right]$ Deff Dispersionskoefficient, mekanisk / hydrodynamisk dispersion $\left|\frac{L^2}{T}\right|$ D_h Diffusionskoefficient for stof i jord $\left(D_{p,l} = D_{0,l} \cdot \lambda\right) \begin{bmatrix} \frac{L^2}{T} \end{bmatrix}$ $D_{p,l}$ Den effektive diffusions-dispersionskoefficient $\left(D_R = \frac{D}{R}\right) \left[\frac{L^2}{T}\right]$ D_R Einstein-Smoluchowski konstant (afhænger af $\frac{C}{C_o}$) [-] ESSandsynlighed (Likelihood) [-] L f Afstand fra boring til stagnationspunktet [L] F Fordampning $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ Tyngdeacceleration $\left|\frac{L}{T^2}\right|$ g h Trykhøjde [L] dh dl Hydraulisk gradient $\begin{bmatrix} L \\ L \end{bmatrix}$ Ι Indvinding $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ Permeabilitet $[L^2]$ k K Hydraulisk ledningsevne $\begin{bmatrix} L \\ \overline{T} \end{bmatrix}$ Distributionskoefficient $\left|\frac{L^3}{M}\right|$ K_d K_s Mættet hydraulisk ledningsevne $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ L Længde [L] Magasinkoefficienten [-]т Masse [M] М Ma Magasinering $\left|\frac{L}{T}\right|$ Antal observationer [-]п Netto nedbør $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ Ν Р Brutto nedbør $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ Darcy flux $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ qDiffusiv flux $\begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}$ q_0 Source/sink i flow rate pr. volumen $\begin{bmatrix} \frac{1}{T} \end{bmatrix}$ q_s Ændring i raten i den transiente grundvandsmagasinering $\begin{bmatrix} \frac{1}{T} \end{bmatrix}$ q'_s Flow / Pumpeydelse $\left[\frac{L^3}{T}\right]$ Q

```
Afstand mellem pumpeboring og observationsboring [L]
r
R
             Retentionsfaktor [-]
R^2
             Korrelationskoefficient [-]
             Sænkning [L]
S
             Source/sink led \left[\frac{M}{L^3 \cdot T}\right]
S
t
             Tid [T]
             Transmissiviteten \begin{bmatrix} \frac{L^2}{T} \end{bmatrix}
Т
             Transpiration \begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}
T_R
             Porevandshastighed \begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}
и
             Darcy hastighed \begin{bmatrix} L \\ T \end{bmatrix}
v
             Volumen [L^3]
V
             Afstand [L]
х
             Specifik tyngde \left[\frac{M^2}{L^2 T^2}\right]
Mass transfer koefficient \left[\frac{1}{T}\right]
γ
ζ
             Dynamiske viskositet \begin{bmatrix} M \\ L \cdot T \end{bmatrix}
η
             Porøsitet \left[\frac{L^3}{L^3}\right]
θ
λ
             Snoethedsfaktor [-]
             Densitet \left[\frac{M}{L^3}\right]
ρ
             Densitet for naturlig kalk (bulk density) \left[\frac{M}{L^3}\right]
\rho_b
             Longitudinale dispersivitet [L]
\tau_D
             Poretryk \left[\frac{M}{L \cdot T^2}\right]
ψ
```

Akronymliste

eff	Effektiv
erfc	Komplementær fejlfunktion
fc	Mark kapacitet
gvs/GVS	Grundvandsspejl
im	Immobil
jof/JOF	Jordoverflade
KVS	Kapilært vandspejl
то	Mobil
m.u.t.	Meter under terræn
nat	Naturlig
RB	Randbetingelse
wc	"Wilting capacity"
wp	"Wilting point"
-	

English summary

This project deals with water and solute transport. The basis of this investigation takes place in Drastrup, a small village located south-west of Aalborg. The Water Supply Department of Aalborg Municipality extracts about one fifth of their total amount from the abstraction site in Drastrup. In 1986, nitrate pollution was discovered in the upper aquifer. Due to the fact that agriculture in the catchment area was the main contributor to increased nitrate concentrations, a different use of the area was imposed. The land use changed over the years as restrictions and compulsory purchases were made. However, a decade later, the change in land use has not yet affected the measured nitrate concentrations below the groundwater table. The geology of the catchment area is primarily composed of sand, clay, and limestone. Through a theoretical description of the transport of water and compounds, it is determined that limestone has a retarding effect, caused by its dual porosity. Therefore, the change in land use is not yet seen in the measured nitrate concentrations below the groundwater table. Based on this theoretical description the proposed hypothesis is:

The reason that the change in land use is not visible in the measured nitrate concentrations in the groundwater aquifer, is due the fact that the geological composition mostly consists of fractured limestone in the catchment area.

In order to verify or reject this hypothesis experiments were conducted. The purpose of the three experiments conducted in this report was to describe how the transport of nitrate in fractured limestone takes place. The three experiments were conducted on different scales in order to verify the importance of the scale. At a lower scale the amount and size of fractures may vary a lot from one sample to another, whereas at a larger scale the distribution of fractures evens out. The experiments are presented as:

- Flow experiment at a small scale
- · Flow and solute transport experiment at a medium scale
- Flow and solute transport experiment at a large scale

The flow experiment at a small scale has been conducted on intact cylindrical samples placed in a steel cylinder. The samples have been extracted from Mjels limestone quarry. Each of the six samples had a length and diameter of 5 cm. The intact samples have been placed in an experimental setup with a water pressure of 5,1 m. Measuring the amount of water passing through the limestone samples over a given time, the saturated hydraulic conductivity could be calculated using Darcy's formula. Afterwards, the samples have been dried, and the total porosity has been determined. The hydraulic conductivities for samples taken horizontally varied between $3,04 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ and $2,90 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, and for samples taken vertically $2,28 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ and $3,20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Based on the ratio between the samples taken horizontally and vertically, an anisotropic factor $\left(\frac{K_{horizontal}}{K_{vertical}}\right)$ has been determined as being somewhere between 1 and 127. The average total porosity has been determined to $0,44 \frac{\text{cm}^3 \text{pores}}{\text{cm}^3 \text{soil}}$.

The flow and solute transport experiment at a medium scale has been conducted on a larger intact sample, compared to the flow experiment at a small scale, with a (length, width, height) = (61 cm, 34 cm, 40 cm). The block has been extracted to a wooden box with cellular rubber on the sides to prevent any damage to the block. The block has been extracted from Mjels limestone quarry.

In the laboratory, an experimental setup has been created to add a small basin in each end of the block. The basins have been used to create a flow through the limestone. Basin one has been filled with chloride, then with fresh water, twice. This has been done to separate the transport processes. The concentration of chloride has been measured in basin 2 to create breakthrough curves. Based on this data, the effective porosity has been determined to $0.03 \frac{\text{cm}^3\text{pores}}{\text{cm}^3\text{soil}}$. Furthermore it has been determined that the dispersion had a minor influence. By measuring the flow through the block and using Darcy's formula, the average hydraulic conductivity has been calculated to $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. The most important part of this experiment has been to get an understanding of the diffusion between the fractures and the matrix. It has been found that the governing transport process is the exchange for solutes between the fractures and the matrix. To visualize the fractures and matrix, a colourant experiment has been conducted. Through this experiment, it has been found that the block contains fractures of both small and medium size, and that the average distance between the fractures is about 5 cm. To be able to predict the transport of water and solutes in Drastrup, the experiment has been modeled using different simplified methods, since a full dynamic model is both time and equipment demanding. Using an analytical solution and two numerical GMS models (one with sorption, one with dual porosity) a fitting process has been conducted. It has been found that all three methods could describe the retention, however none of them entirely correct. To evaluate the GMS model with dual porosity, a GLUE analysis has been conducted. This rejects the hypothesis that only one correct solution exists. It has been found that the system can be modeled with different sets of parameters.

The flow and solute transport experiment at a large scale is conducted in the field near Drastrup abstraction site 1. The experiment is conducted as a push-pull experiment, which is a tracer experiment using only one well. The large scale experiment includes all three levels of fractures and is therefore the most reliable experiment regarding the determined hydraulic conductivity in Drastrup. However, this experiment is only used to determine the saturated hydraulic conductivity and the effective porosity, due to the short timescale of the experiment. After the experiment has been conducted in the field, the measured breakthrough curves have been modeled using GMS. Through a fitting process, a saturated hydraulic conductivity of $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ and an effective porosity at $0,014 \frac{\text{cm}^3 \text{pores}}{\text{cm}^3 \text{soil}}$ has been determined.

To evaluate when the nitrate concentration in the aquifer is below the groundwater criterion, a threedimensional groundwater model has been constructed. The three experiments are used to recalibrate the groundwater model obtained from NIRAS A/S. To evaluate when the nitrate concentration in the aquifer is below the groundwater criterion, two approaches have been conducted, a simple approach and an advanced approach. The simple approach is used to give a span of the solute transport time based on a particle tracking model and the retention factors determined in the flow and solute transport experiment at a medium scale. Based on the simple approach, the nitrate concentrations will be below the groundwater criterion 33 to 66 000 years from year 1994. The advanced approach is a solute transport model calibrated on measured nitrate concentrations in wells near the Drastrup abstraction sites. From this approach the nitrate concentrations will be below the groundwater criterion 100 to 200 years from 1994. Due to simplifications when setting up the models, it is not possible to use the time scale directly to estimate the time scale for a reduction of the nitrate concentration in the aquifer. However, through an evaluation of subjects it has been assessed that the nitrate concentrations will be below the groundwater criterion 100 to 200 years from now.

Indholdsfortegnelse

1	Dra	strup kildeplads	17
	1.1	Placering og funktion	17
	1.2	Drikkevandsproblematik	18
	1.3	Centrale processer og parametre	25
	1.4	Projektets hypotese og afgrænsning	32
2	Intr	oduktion til forsøg	35
3	Strø	mningsforsøg på lille skala	39
	3.1	Forsøgets formål	39
	3.2	Forsøgets udførelse	40
	3.3	Antagelser	41
	3.4	Resultater	41
	3.5	Sammenfatning	42
4	Strø	mnings- og stoftransportforsøg på mellem skala	43
	4.1	Forsøgets formål	43
	4.2	Forsøgsopstilling	45
	4.3	Forsøgets udførelse	47
	4.4	Analyse af måledata	48
	4.5	Modellering af forsøg	58
	4.6	Usikkerhed ved parameterbestemmelse ved numerisk model med dobbelt porøsitet .	73
	4.7	Sammenfatning	86
5	Strø	mnings- og stoftransportforsøg på stor skala	87
	5.1	Forsøgets formål	87
	5.2	Forsøgets lokalitet	89
	5.3	Forsøgets udførelse	90
	5.4	Analyse af måledata	94
	5.5	Modellering af forsøg	99
	5.6	Antagelser	102
	5.7	Resultater	104

	5.8	Sammenfatning	.07		
6	Diskussion af parameterbestemmelse				
	6.1	Præsentation af anden litteratur	.09		
	6.2	Mættet hydraulisk ledningsevne	10		
	6.3	Anisotropi	.12		
	6.4	Porøsiteter	.13		
	6.5	Longitudinal dispersivitet	.14		
	6.6	Tilbageholdelse af stof i kalkmatricen	.15		
	6.7	Sammenfatning	.16		
7	Effel	xt af ændret arealanvendelse 1	17		
	7.1	Resumé af drikkevandsproblematikken i Drastrup	.17		
	7.2	Modelopsætning og formål	.17		
	7.3	Konceptuel model	.20		
	7.4	Numerisk model	.26		
	7.5	Hydrogeologiske processer	26		
	7.6	Stoftransport processer	.30		
	7.7	Stoftransport i den umættede zone	.35		
	7.8	Resultater	.38		
	7.9	Diskussion	.41		
	7.10	Sammenfatning	.44		
8	Kon	klusion 1	45		
Ι	App	pendiks 1	49		
A	Fakt	a om indvindingsboringer i Drastrup 1	51		
B	Borejournaler 153				
С	Udtagelse af små intakte prøver 16				
D	Udta	gelse af kalkblok 1	65		
Е	Standardkurver for måleudstvr 173				
F	Simpel modelenbygning				
	Sunt	www.wow.op.o.j.sumg	. , ,		
G	Lago	leling ved Drastrup kildeplads 1	81		

Bilagsfortegnelse

E.3 Strømningsforsøg på lille skala

E.3.1 Hydraulisk ledningsevne og porøsiteter [.xlsx]

E.4 Strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala

- E.4.1 Flowmålinger [.xlsx]
- E.4.2 Usikkerhed for hydraulisk ledningsevne [.xlsx]
- E.4.3 Måledata og korrigering [.xlsx]
- E.4.4 Masse balance [.xlsx]
- E.4.5 Metode 1, Analytisk løsning [.xlsx]
- E.4.6a Metode 2, GMS med sorption [.xlsx]
- E.4.6b Metode 2, GMS med sorption GMS Modeller [.rar]
- E.4.7a Metode 3, GMS med dobbelt porøsitet [.xlsx]
- E.4.7b Metode 3, GMS med dobbelt porøsitet GMS Modeller [.rar]
- E.4.8 Usikkerhed ved parameterbestemmelse ved numerisk model [.xlsx]

E.5 Strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala

- E.5.1 Indvindingstilladelse [.pdf]
- E.5.2 Udledningstilladelse [.pdf]
- E.5.3 Arbejdsplan [.xlsx]
- E.5.4 Cooper-Jacobs [.xlsx]
- E.5.5 Simpel modelopbygning [.rar]
- E.5.6 Rå flowdata fra vandværket [.xlsx]
- E.5.7 Fitting af data [.xlsx]
- E.5.8 Standardkurve for Aqua TROLL 200 [.xlsx]
- E.5.9 Resultater af kalibrering [.xlsx]

E.7 Effekt af ændret arealanvendelse

- E.7.1 Drastrup model [.xlsx]
- E.7.2 Stoftransportmodel [.rar]

Drastrup kildeplads

Følgende kapitel har til formål at præsentere projektlokaliteten samt drikkevandsproblematik på lokaliteten. Ydermere gives en teoretisk beskrivelse af de centrale processer og parametre, der har betydning for det videre projekt. Slutteligt opstilles en hypotese for projektet og denne afgrænses.

1.1 Placering og funktion

Sydvest for Aalborg ligger landsbyen, Drastrup, se figur 1.1. I området nord for Drastrup indvinder Aalborg Forsyning, Vand A/S grundvand til at forsyne borgere og industri i Aalborg by. Hvert år indvindes ca. 1,5 mio. m³ vand, svarende til 1/5 af den total indvundne mængde fra Aalborg Forsyning, Vand A/S' kildepladser (Forsyningsvirksomhederne, 2009). I fremtiden forventes det, at der skal indvindes større mængder vand grundet indstilling af indvinding i de bynære områder, hvor der findes flere kilder til forurening af grundvandet. Det ønskes derfor at have en mulig indvindingskapacitet på 2,6 mio. m³ pr. år. Som følge heraf er Drastrup kildepladser en vigtig vandressource for Aalborg Forsyning, Vand A/S. (Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000)



Figur 1.1: Placering af Drastrup og kildepladser sydvest for Aalborg samt helhedsplanområde. (Aalborg Universitet, 2004)

1.2 Drikkevandsproblematik

Drastrup kildeplads 1 blev etableret i 1984, da Skalborg Vandforsyning var nødsaget til at lukke grundet grundvandsforurening. Dette satte gang i en idefase omhandlende, hvorledes en grundvandsforurening kunne undgås i fremtiden. (Madsen et al., 2002)

I 1986 opdagede forsyningen imidlertid en kvælstofforurening af grundvandet særligt i det øvre grundvandsmagasin på Drastrup kildeplads 1. Der blev målt en nitratkoncentration på ca. $120 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$, hvor den tilladte grænseværdi for grundvandet er $50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ (Madsen et al., 2002). Ydermere, blev der fundet spor af pesticider og nedbrydningsprodukter af pesticider i grundvandet. Dette blev for alvor startskuddet til iværksættelsen af et pilotprojekt med formålet at beskytte grundvandet udført af tidligere Aalborg Kommune i samarbejde med forhenværende Nordjyllands Amt. Planen var at sikre muligheden for indvinding af vand, som udelukkende skulle undergå en simpel vandbehand-ling (iltning og filtrering) i fremtiden. (Aalborg Kommune, Forsyningsvirksomhederne og Teknisk Forvaltning, 2001)

Ved projektets start i 1986 foretoges en afgrænsning af indvindingsoplandet til den mest sårbare del. Denne afgrænsning ses på figur 1.1 illustreret som "Helhedsplanområde" og har et areal på ca. 890ha. (Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000) I midten af 1980'erne var arealanvendelsen i området fordelt på ca. 75% landbrug samt 15% grusindvinding og skov. Den resterende del udgjordes af by (Madsen et al., 2002). Siden projektets start er der løbende blevet udarbejdet planer (Vandindvindingsplan, Regionplantillæg, osv.) for arealanvendelsen af området, hvilket i år 2000 mundede ud i en helhedsplan (Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000) for, hvorledes anvendelsen var anno 2000, se figur 1.2, og en målsætning for den fremtidige anvendelse, se figur 1.3.



Figur 1.2: Oversigt over arealanvendelse anno 2000 i helhedsplanområdet. (Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000, Redigeret)



Figur 1.3: Oversigt over den målsatte arealanvendelse i helhedsplanområdet. (Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000, Redigeret)

Herved blev den foretagede grundvandsbeskyttelse hovedsagligt i form af en ændring i arealanvendelsen. Målet var, og er fortsat, "*at nedbringe kvælstoftallet til nul, så vidt det er muligt*" (Madsen et al., 2002, s. 23) og stoppe brugen af pesticider. I tabel 1.1 ses fordelingen af arealanvendelsen for år 2000 og målsætningen. Fra projektets start til år 2000 er ca. 25% af landbrugsarealerne blevet erstattet med grønne arealer hovedsagligt skov. Dette valg skyldtes, at der i Aalborg Kommune forekom et underskud af skovarealer samt en mangel på rekreative områder i omegnen af Aalborg. (Madsen et al., 2002)

	Arealanvendelse [%]		
	År 2000	Målsætning	
Eng	6	5	
Fugtig eng	1	1	
Græs	14	14	
Landbrug	51	30	
Løvskov	15	35	
Nåleskov	13	15	

Tabel 1.1: Fordeling af arealanvendelsen i år 2000 og målsætningen i Helhedsplanen. (Aalborg
Kommune og Sven Allan Jensen ApS, 2000)

I tabel 1.1 ses det, at tidligere Aalborg Kommune og forhenværende Nordjyllands Amt havde en målsætning i 2000 om en yderligere reduktion af landbrugsareal med ca. 20%. På baggrund af figur 1.4 kan det vurderes, at denne målsætning endnu ikke er opfyldt, og at der kun er sket en mindre reduktion af landbrugsarealer siden 2000.



Figur 1.4: Skovarealer i Drastrup området i 2012. Løvskov og andet indikerer, at skovtypen er ukendt. Primært syd-vest for kildepladserne er landbrugsarealer omlagt til skov. (Naturstyrelsen, 2012, Redigeret)

Nitrat i rodzonen

I forbindelsen med ændringen i arealanvendelsen fra landbrug til ekstensive driftsformer blev porevandssonder etableret for at kontrollere ændringens virkning i forhold til kvaliteten af det udvaskede vand fra rodzonen. Der er blevet registreret en hurtig og markant ændring af indholdet af kvælstof, en reduktion til 0 - 5 $\frac{mg}{L}$. (Madsen et al., 2002) På figur 1.5 ses beregnede nitratudvaskninger i Drastrup området for år 1994, 1998 og 2001. Ud fra beregningerne er det fundet, at nitratkoncentrationen i vandet der forlader rodzonen gennemsnitligt i 1994 var 79 $\frac{mg}{L}$. I 1998 var denne værdi faldet til 62 $\frac{mg}{L}$ og i 2001 til 46 $\frac{mg}{L}$, hvorved koncentrationen i gennemsnit var under den tilladte grænseværdi på 50 $\frac{mg}{L}$ for det indvundne grundvand.



Figur 1.5: Oversigt over udvaskningen af nitrat i Drastrupområdet. Boring 34. 1743 og 34. 1744 er markeret med pink cirkel, og boring 34. 1705 er markeret med tyrkis cirkel. (NIRAS A/S, 2001, Redigeret)

Udviklingen af kvælstofindholdet i grundvandet skal ligeledes sammenholdes med kvælstofoverskud fra gødskning af markerne. På figur 1.6 ses det årlige kvælstofoverskud pr. ha dyrket areal minus brakareal i Danmark fra 1900 til 2005. Det ses, at kvælstofoverskuddet er stigende fra 1900 til 1980, hvorefter det i perioden fra 1980 til 1994 er konstant på ca. 170 $\frac{\text{kgN}}{\text{ha}}$, og efter 1994 er overskuddet faldende. Faldet skal ses i takt med, at der blev vedtaget flere miljøtiltag af Miljøministeriet, som begrænsede mængden af brug af gødning i landbruget.



Figur 1.6: Årlig kvælstofoverskud pr. ha dyrket areal minus brakareal i Danmark. (Kyllingsbæk, 2008)

Nitrat i grundvandet

På baggrund af en ændring i arealanvendelsen og et fald i kvælstofoverskud for de dyrkede arealer, er det således forventet, at kvælstofkoncentrationen i grundvandet er faldende. For at kontrollere dette, er der blevet etableret flere moniteringsboringer i området. På figur 1.7 til 1.9 ses målte nitratkoncentrationer i årene 1990, 2000 og 2010 i forsynings- og moniteringsboringer ved forskellige dybder i området.



Figur 1.7: Målte nitratkoncentrationer i 1990. Bemærk, at størrelsen på symboler er relateret til filterdybde. Mindste størrelse er svarende til en filterdybde på 0 - 10 m under gvs. Mellem størrelse er svarende til en filterdybde på 10 - 30 m under gvs. Stor størrelse er svarende til en filterdybde dybere end 30 m under gvs. (Aalborg Universitet, 2004)



Figur 1.8: Målte nitratkoncentrationer i 2000. Bemærk, at størrelsen på symboler er relateret til filterdybde. Mindste størrelse er svarende til en filterdybde på 0 - 10 m under gvs. Mellem størrelse er svarende til en filterdybde på 10 - 30 m under gvs. Stor størrelse er svarende til en filterdybde dybere end 30 m under gvs. (Aalborg Universitet, 2004)



Figur 1.9: Målte nitratkoncentrationer i 2010. Bemærk, at størrelsen på symboler er relateret til filterdybde. Mindste størrelse er svarende til en filterdybde på 0 - 10 m under gvs. Mellem størrelse er svarende til en filterdybde på 10 - 30 m under gvs. Stor størrelse er svarende til en filterdybde dybere end 30 m under gvs. (Aalborg Universitet, 2004)

Ud fra figur 1.7 til 1.9 ses det, at der ikke forekommer betydelige ændringer i nitratkoncentrationerne i grundvandet på trods af ændringerne i arealanvendelsen og faldet kvælstofoverskud. Generelt er der målt en nitratkoncentration over den tilladte grænseværdi for grundvandet på 50 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ i den øverste del af magasinet. Nitratkoncentrationen er under grænseværdien i det indvundne vand i forsyningsboringerne, hvor filtrene er placeret dybere, dog er koncentrationen stigende.

De geologiske profiler for boringerne 34. 1705 og 34. 1743, markeret på figur 1.9, er illustreret på figur 1.10. Dette gøres for at give et illustrativt billede af de repræsenterede lag i området. Som det fremgår, er boring 34. 1705 beliggende i sanddominerende geologi, og boringerne 34. 1743 og 34. 1744 i kalkdominerende geologi.



Figur 1.10: Geologiske profil af boring 34. 1705 samt boring 34. 1743 og 34. 1744. Profilerne er ikke målfaste. (GEUS, 2011)

Nitratkoncentrationen i kalkdominerende geologi, boring 34. 1743 og 34. 1744

Generelt se det ud fra figur 1.10 at der ved boringerne 34. 1743 og 34. 1744 findes kalk i hele dybden, samt at grundvandsspejlet er placeret 9,41 m under terræn, se borejournal i appendiks B. Boringerne er begge lokaliseret ca. 300 m syd for Drastrup kildeplads 1 jf. figur 1.9. Arealanvendelsen i det nære

opland til boringerne har været dyrket mark indtil nu, se figur 1.4 og 1.5. På figur 1.11 ses de målte nitratkoncentrationer i boring 34. 1743 og 34. 1744 ved forskellige filterdybder.



Figur 1.11: Målt nitratkoncentration i kalkdominerende geologi i boring 34. 1743 og 34. 1744 ved forskellige filterdybder. (GEUS, 2011)

Det ses, at nitratkoncentrationen er stigende for målingerne i de tre øverste filterdybder frem til ca. 2005, hvorimod målinger fra det dybeste filter er konstant gennem hele perioden på knap $20 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. I år 2005 stagnerer målingerne fra de to øverste filtre, hvorimod målingerne i det tredje dybeste filter fortsat er stigende. De sidste 3 års målinger fra det øverste filter kan tolkes til, at nitratkoncentrationen er ved blive reduceret, men for endeligt at kunne konkludere dette er flere målinger nødvendige.

Da arealanvendelsen i det nære opland til boringerne har været et dyrket landbrugsareal kan de målte nitratkoncentrationer i grundvandet, figur 1.11, sammenlignes med det årlige kvælstofoverskud, figur 1.6. Det årlige kvælstofoverskud har været faldende siden 1994, og koncentrationen i det øverste filter kan tolkes til at have været faldende siden år 2007. Heraf kan det konkluderes, at reduktionen af nitratkoncentrationen i grundvandet er ca. 14 år forsinket i forhold til reduktionen af kvælstofoverskuddet forårsaget af geologien i den umættede zone på ca. 9 m.

Nitratkoncentrationen i sanddominerende geologi, boring 34. 1705

Sammenholdes målinger af nitratkoncentrationen fra boring 34. 1743 og 34. 1744 med målinger af nitratkoncentrationen fra boring 34. 1705, se figur 1.12, ses det, at koncentration i boring 34. 1705 falder drastisk i perioden fra 1988 til 1993 fra ca. 150 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ til ca. 20 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$.



Figur 1.12: Målt nitratkoncentration i sanddominerende geologi i boring 34. 1705 ved filterdybde 6,81 - 12,81 m under gvs. (GEUS, 2011)

Dette tyder på, at der er sket en ændring i arealanvendelsen fra dyrket landbrugsareal til anden anvendelse før år 1988. På nitratudvaskningskortet, se figur 1.5, ses det endvidere, at udvaskningen i årene 1994, 1998 og 2001 er beregnet til mindre end $25 \frac{mg}{L}$ for marken opstrøms. Denne boring indvinder, som illustreret på figur 1.10, vand fra et sandlag, der starter ved terræn. Grundvandsspejlet

er placeret ca. 8 m under terræn, og filteret er placeret 15 - 21 m under terræn. I appendiks B findes borejournalen. Da det ikke vides, hvornår en evt. omlægning af arealanvendelsen er forekommet, kan det ikke præciseres, hvor stor en forsinkelse der findes for nitratkoncentration i forhold til ændringen i arealanvendelsen. Det kan dog ses af figur 1.12, at reduktionen sker over minimum 5 år, og at koncentrationen er målt til ca. 150 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ i år 1988, hvorved det forventes, at koncentration ikke har været meget højere. Herudfra vurderes det, at omlægningen kan være sket op til 3 år tidligere end 1988, altså i år 1985. Det vurderes således, at reduktionen af nitratkoncentrationen i grundvandet er 5 - 8 år forsinket i forhold til den udvaskede koncentration grundet arealomlægningen forårsaget af det overliggende sandlag på ca. 15 m.

Ud fra disse observationer kan det konkluderes, at der i kalk kontra sand forekommer en langsommere ændring i nitratkoncentrationer i grundvandet pga. ændringer i koncentrationen i det infiltrerende vand.

1.3 Centrale processer og parametre

Den langsommere ændring i nitratkoncentrationen i kalk (figur 1.11) i forhold til i sand (figur 1.12), grundet ændringerne i nitratkoncentrationen i det infiltrerende vand, må skyldes forskelle i, hvorledes vand og stof transporteres i sand og kalk i henholdsvis den mættede og umættede zone. I de følgende afsnit beskrives derfor, hvorledes vand og stof transporteres i sand og kalk i henholdsvis den mættede og umættede zone.

1.3.1 Mættet zone

I den mættede zone er det den horisontale transport af vand og stof, som findes interessant i forhold til forurening af grundvandsmagasinet, da denne transport er af betydning for risikoen for forurening af det indvundne vand.

Vandtransport i sand

Sandjordes evne til at transportere vand kan beskrives ved Darcys lov, ligning (1.1) (Spitz og Moreno, 1996).

$$v = \frac{Q}{t} = -AK_s \frac{dh}{dl} \tag{1.1}$$

Herved er Darcy hastigheden direkte proportional med tværsnitsarealet, den mættede hydrauliske ledningsevne og den hydrauliske gradient. Den mættede hydrauliske ledningsevne kan bestemmes ud fra ligning (1.2) (Spitz og Moreno, 1996).

$$K_s = \frac{k\rho g}{\eta} \tag{1.2}$$

Heraf er vandets densitet og dynamiske viskositet konstante, da grundvandet har en konstant temperatur på ca. 8 °C. Den mættede hydrauliske ledningsevne er hermed direkte proportional med permeabiliteten. Permeabiliteten er afhængig af størrelsen og variationen af strømningsveje og den effektive porediameter, jo større porer desto mindre modstand mod flow. Størrelsen af porerne hænger endvidere sammen med jordpartiklernes størrelse for porøse medier. Jo større partikler desto større ledningsevne. Dette medfører således, at groft sand har større ledningsevne end fint sand. Groft sand har en hydraulisk ledningsevne i størrelsesorden $9 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$, hvorimod fint sand har en hydraulisk ledningsevne i intervallet $2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$ (Loll og Møldrup, 2000). Haves en homogen velsorteret sandjord, vil vandet strømme i ca. halvdelen af porevolumenet, se tabel 1.2 for værdier for porøsiteter. Porevandshastigheden vil kunne bestemmes ved ligning (1.3) (Spitz og Moreno, 1996).

$$u = \frac{v}{\theta_{eff}} \tag{1.3}$$

Vandtransport i kalk

Vandtransporten i kalk foregår i princippet på samme vis som for sand, dog med den forskel, at størstedelen af transporten sker i en mindre del af porevolumenet grundet dobbelt porøsitet. Dette kommer af, at kalk er bestående af sprækker og matrice, hvor størstedelen af vandtransporten sker i kalkens sprækker. Sprækker udgør ca. 0,01 - 0,05 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ af totalporøsiteten på 0,30 - 0,45 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Den resterende del af porevolumenet udgøres af kalkmatricen, som hovedsagligt består af porer af størrelsen 0,1 - 1 μ m, hvorved kalkmatricen har en lav hydraulisk ledningsevne i størrelsesordenen $10^{-9} - 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Grundet sprækkerne har kalk dog totalt set en høj hydraulisk ledningsevne i størrelsesordenen $10^{-5} - 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket er svarende til ledningsevnen for groft sand. Grundet, at de vandførende sprækker kun udgør en mindre del af total porøsiteten, vil porevandshastigheden herved være større i kalk end i sand. (Price et al., 1993)

Tabel 1.2: Tabelværdier for sand og kalk. For sand er den mættede hydrauliske ledningsevne fra Loll og Møldrup (2000), og porøsiteter er for udvalgte sandjorde fra Hansen (1976). Værdier for kalk er fra Price et al. (1993). * Opgjort som specifik ydelse.

	Sand	Kalk
Mættet hydraulisk ledningsevne, mobil fase $\left[\frac{m}{s}\right]$	$9 \cdot 10^{-7}$ - $6 \cdot 10^{-3}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Mættet hydraulisk ledningsevne, "immobil fase" $\left[\frac{m}{s}\right]$	-	10^{-9} - 10^{-8}
Total porøsitet $\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	0,35 - 0,50	0,30 - 0,45
Effektiv porøsitet $\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	0,20 - 0,35	0,01 - 0,05*

Stoftransport i sand

Ikke-reaktive stoffer vil som gennemsnitsbetragtning bevæge sig med vandets middelhastighed. I procesbeskrivende sammenhænge kaldes denne transport også for advektion. Grundet, at stoftransporten med advektion foregår langt hurtigere end stoftransporten ved diffusion kan diffusionsprocessen negligeres. Da den advektive transport beskriver transporten ved en middelhastighed, tages der ikke højde for spredningen, forårsaget af hastighedsvariationer i porerne og transporten af forskellige strømningsveje. For at kompensere for afvigelser i den gennemsnitlige middelhastighed tilføjes dispersion. Dispersion, afgivelsen fra middelhastigheden, beskrives som en diffusionsproces. Teoretisk set har dispersion ikke noget at gøre med diffusion, men rent empirisk har dette vist sig korrekt.

Haves et reaktivt stof, i modsætning til tidligere omtalte ikke-reaktive stoffer, vil stoffet kunne tilbageholdes ved sorption til jordpartikler eller nedbrydes under transporten.

Nitrat er et uorganiske, let opløseligt stof i vand. Nitrat (NO3⁻) er negativt ladet, hvorfor det frastødes af lerpartikler, som også er negativt ladede. Fjernelsen af nitrat sker ved denitrifikation, en bakteriel proces, oftest af heterotrofe bakterier, hvor nitraten omdannes til frit kvælstof. For at denitrifikationen kan forekomme kræves tilnærmelsesvis iltfrie forhold, mindre end $0,2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ (Feast et al., 1998), da bakterierne ellers bruger ilt som elektron acceptor. Ydermere kræver processen, at organisk materiale er til stedet som elektron donor. Denitrifikationen vil således forekomme i sand i dybden, hvor ilten ikke kan trænge ned.

Stoftransport i kalk

Stoftransporten i kalk foregår grundlæggende ligesom i sand, dog er transporten, grundet kalkens dobbelte porøsitet, afhængig af koncentrationsgradienten mellem sprække og matrice. Figur 1.13 illustrerer kalkens opbygning og hvilken transportproces, der er dominerende for hver fase.



Figur 1.13: Kalkens opbygning af sprækker og matrice, og den dominerende transportproces i hver fase.

Udvekslingsprocessen i kalken er styret af en koncentrationsgradient imellem sprækker og matrice, altså af diffusion. Når koncentrationen i matricen er mindre end koncentrationen i sprækken vil stof blive transporteret fra sprækken og ind i matricen ved diffusion. Stoftransporten går herved fra at være hurtig i sprækken til at være langsom eller stillestående i matricen. Efter en given tidsperiode vil koncentrationen i matricen være lig koncentrationen i sprækken, hvorved der ikke længere forekommer en diffusion imellem sprækken og matricen. Det ny tilførte stof vil således transporteres hurtigt i sprækken. Når koncentrationen i matricen er større end koncentrationen i sprækken, vil stof blive transporteret fra matricen ud i sprækken og transporten af stof vil igen forekomme hurtig.

Ved denne udveksling af stof mellem sprække og matrice tilbageholdes stof. Størrelsen af udvekslingen af stof mellem sprække og matrice afhænger af sprækkens appertur (diameter), afstanden mellem sprækkerne og vandets hastighed i sprækkerne. (Price et al., 1993)

Viden om potentialet for denitrifikation i kalk er begrænset. Feast et al. (1998) og Howard (1985) har dog fundet, at denitrifikationsraten i kalk er begrænset. Ydermere har Feast et al. (1998) fundet at for at denitrifikationen kan forekomme skal iltindholdet i vandet være under $0.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. I Drastrup området er det fundet, at iltindholdet i indvindningsboringerne er over $0.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$, herved kan nedbrydningen ikke forekomme i sprækkerne. Det er derimod muligt at der forekommer denitrifikation inde i matricen, hvor ilten ikke kan trænge ind, men sprækkerne stadig kan forsyne matricen med organisk stof. Det vurderes dog, at denne nedbrydning er lille.

1.3.2 Umættet zone

I den umættede zone er det den vertikale transport fra jordoverfladen til grundvandsspejlet, som findes interessant i forhold til, hvor stor en forsinkelse af nitrat der forekommer.

Vandtransport i sand

For vandtransporten i sand i den umættede zone gælder Darcys lov, ligesom for den mættede zone. Transporten adskiller sig dog ved, at den hydrauliske ledningsevne også er afhængig af vandindhold eller poretryk. Jo mindre vandindhold eller større poresug desto lavere hydraulisk ledningsevne. Dette skyldes, at når jorden drænes fra vandmættet tilstand, drænes de store porer første, hvorved mindre porer efterlades til at transportere vandet, og disse har en lavere hydraulisk ledningsevne. Darcys lov er dog udviklet for stationært flow i den mættede zone, men da der i den umættede zone ofte forekommer ændringer i vandindhold og poretryk over tiden ændres flowet ligeledes. Ud fra denne betragtning kan Darcys lov skrives som ligning (1.4). (Loll og Møldrup, 2000)

$$v = -AK(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} = \underbrace{-AK(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z}}_{Poresug} \underbrace{+AK(\theta) \frac{\partial z}{\partial z}}_{Gravitation}$$
(1.4)

Hvor den hydrauliske ledningsevne ligeledes kan være afhængig af poretrykket. *z* regnes positivt ned fra jordoverfladen til grundvandsspejlet.

Der er således i den umættede zone to kræfter; poresug og gravitation, som har indflydelse på, hvor hurtigt transporten af vand sker fra jordoverfladen til grundvandsspejlet. Jordens poresug forsøger af tilbageholde vandet i porerne, hvor størrelsen af suget afhænger af porestørrelsen. Gravitationskraften driver vandet ned gennem jorden.

På figur 1.14 ses en retentionskurve for groft sand. Det ses, at over halvdelen af jordens porer er drænet, når jorden er ved mark kapacitet, θ_{fc} .



Figur 1.14: Retentionskurve for sand. (Loll og Møldrup, 2000)

Sand dræner derfor hurtigt vand fra overfladen og efterlader derved ikke meget vand til transport i den umættede zone i tørvejrsperioder. Dette er illustreret på figur 1.15.

Ud fra denne betragtning kan der laves en overslagsberegning over, hvor hurtig vand transporteres igennem den umættede zone. Det kan gøres ved at regne på transport ved ren advektion. Hvis der haves en årlig nettonedbør på ca. 300 mm, og det antages, at andelen af den effektive porøsitet som deltager i at transportere vandet udgør $0,1 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$ kan følgende betragtes:

$$u = \frac{v}{\theta_{eff}}$$
$$= \frac{300 \frac{\text{mm}}{\text{år}}}{0.1 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}}$$
$$= 3 \frac{\text{m}}{\text{år}}$$

Således kan en gennemsnitlig porevandshastighed på 3 $\frac{m}{ar}$ bestemmes.



Figur 1.15: Skitse af vandindhold ved en given dybde i hhv. sand (sort) og kalk (rød). (Loll og Møldrup, 2000, Redigeret)

Vandtransport i kalk

Vandtransporten i kalkens umættede zone foregår efter samme princip som i sand. Den eneste forskel er, som figur 1.15 og 1.16 illustrerer, at kalken vil være næsten vandmættet under drænede forhold, grundet matricens poresug er større end trykket for "air-entry". For kalk er det således kun sprækkerne, som er drænet for vand. Ved nedbør er infiltrationshastigheden afgørende for, om der opstår sprækketransport. Er infiltrationshastigheden lig eller mindre end matricens mættede hydrauliske ledningsevne, vil vandet blive transporteret i matricen ned mod grundvandsspejlet, da den maksimale vertikale hydrauliske gradient er lig en. Hvis infiltrationshastigheden stiger vil poretrykket stige ved overfladen, hvilket medfører, at sprækkerne begynder at fyldes med vand og en langt hurtigere transport vil opstå.

Den mættede hydrauliske ledningsevne for matricen er maksimalt $10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, se tabel 1.2. Ud fra denne betragtning må der således opstå sprækketransport, når regnintensiteten er større end ca. $10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ svarende til 0,01 $\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$, hvilket vil overgås ved de fleste regnhændelser. Kalkens totale hydrauliske ledningsevne er langt større, da sprækkerne benyttes ved højere regnintensiteter. Den totale hydrauliske ledningsevne er ca. $10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ svarende til $1000 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$. Denne regnintensitet opnås aldrig, hvorfor kalken aldrig vil forekomme mættet i den umættede zone. Hvis regnintensiteten er mindre end matricens hydrauliske ledningsevne vil vandets hastighed fra terræn ned mod grundvandsspejlet således være ca. $\frac{300 \frac{\text{m}}{\text{ar}}}{0.4 \frac{\text{cm}^2\text{port}}{\text{cm}^2\text{port}}} = 0.75 \frac{\text{m}}{\text{ar}}$, hvis der laves en lignende overslagsberegning som tidligere. Hvis regnintensiteten derimod er større end matricens hydrauliske ledningsevne tages sprækkerne i brug, og hastigheden hvormed vandet transporteres fra terræn ned mod grundvandspejlet, kan være op til $\frac{300 \frac{\text{m}}{\text{ar}}}{0.01 \frac{\text{cm}^2\text{port}}{\text{cm}^2\text{port}}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{ar}}$. Da regnintensiteten svinger fra lave til højere intensiteter vil vandets hastighed således hele tiden svinge mellem langsom og hurtig transport.

Denne betragtning kan dog kun anvendes under forudsætning af, at kalken starter ved terrænniveau, hvilket i mange tilfælde ikke forekommer, da kalken overlejres af sand. Hvis kalken overlejres af sand vil dette lag have funktion som et forsinkelsesbassin, hvorved regnhændelsernes intensiteter udlignes. Vandet vil hermed komme med en mere jævn tilstrømning til kalklaget. Hvis sandlaget er tilstrækkeligt tykt, kan det antages, at nettonedbøren udlignes over hele året. Infiltrationshastigheden, hvormed vandet når kalklaget, vil således være svarende til $\frac{300 \text{ mm}}{0.1 \text{ cm}^{1}\text{poter}} = 3 \frac{\text{m}}{\text{a}\text{r}} = 9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket svarer til matricens mættede hydrauliske ledningsevne. Vandtransporten vil herved hovedsageligt foregå i matricen ved "piston displacement". For at denne effekt kan opnås skal sandlaget dog havde en tykkelse svarende til ca. afstanden for et års transport, hvilket i dette tilfælde er ca. 3 m. Er tykkelsen af sandlaget mindre end 3 m vil vandet blive transporteret i sprækker eller matrice afhængigt af infiltrationshastigheden.



Figur 1.16: Retentionskurve for kalk. (Price et al., 1993, Redigeret)

Stoftransport i sand

Da nitraten ikke sorberes til sand, vil nitrat blive transporteret med en gennemsnitlig vandhastighed på ca. $3\frac{m}{ar}$ ned til grundvandet. Denne hastighed er beregnet ud fra ren advektion, dvs. dispersionen negligeres. Ydermere negligeres denitrifikationen, da det formodes, at iltkoncentrationen i sandlaget er over $0.2\frac{mg}{T}$.

Stoftransport i kalk

Stoftransporten i kalken i den umættede zone vil ligesom for sandet foregår med vandets hastighed, som tidligere beskrevet afhænger af infiltrationshastigheden og tilstedeværelsen af overliggende sandlag. Ydermere vil stoftransporten ligesom i den mættede zone være afhængig af koncentrationsgradienten mellem sprække og matrice.

Hvis der således ikke forekommer et sandlag over kalken, vil stof blive transporteret med vandet ned gennem sprækkerne. Herved haves tilnærmelsesvis samme scenarie som beskrevet under stoftransport i kalk i den mættede zone. Haves et sandlag over kalken kan det tilnærmelsesvis antages, at stoftransporten foregår i matricen og med dennes hastighed svarende til ca. 0,75 $\frac{m}{ar}$. Ligesom for tidligere beregninger betragtes her et tilfælde med ren advektion.

Anvendelse af procesforståelse

Ud fra ovenstående beskrivelse af vand- og stoftransporten i sand og kalk i hhv. den mættede og umættede zone kan det konkluderes, at nitrat i sand transporteres med vandets hastighed i den mættede og umættede zone. Vandets hastighed i sandet er langsom, men aldrig stillestående. Hvorimod, når nitrat transporteres i kalk veksler transporten mellem tilnærmelsesvis stillestående i matricen og høje hastigheder i sprækker afhængig af koncentrationsgradienten mellem de to faser. Dette resulterer i en stærk forsinkelse af nitraten, hvorved transporten forekommer langsommere i kalk end i sand.

Sanddominerende geologi, boring 34. 1705

Hvis teorien anvendes på tidligere præsenterede boring 34. 1705 se figur 1.17, hvor geologien som tidligere omtalt består af sand fra terræn til filtersætningen 15 m under terræn, og grundvandsspejlet er placeret 8,19 m under terræn, vil nitraten blive transporteret med en hastighed på 3 $\frac{m}{ar}$ i den umættede zone, hvorved det vil tage ca. 2,7 år for nitraten at blive transporteret fra terræn til grundvandsspejlet. Hastigheden af transporten fra grundvandsspejlet til toppen af filteret (15 m under terræn) vil forekomme langsommere end transporten i den umættede zone, da hele den effektive porøsitet er aktiv. Hvis det fortsat antages, at transporten foregår ved "piston displacement"vil hastigheden nu være ca. $\frac{300 \text{ mm}}{0.2 \text{ cm}^2 \text{ porter}} = 1.5 \frac{\text{m}}{\text{ar}}$. Herved vil det tage mindst 4,5 år for nitraten at blive transporteret fra terræn til filteret på 7,2 år, hvilket stemmer overens med, hvad der er vurderet ud fra de målte koncentrationer i boringen på et interval fra 5 til 8 år.



Figur 1.17: Geologiske profil af boring 34. 1705 og boring 34. 1743. Profilerne er ikke målfaste. Tiden th. viser den gennemsnitlige transporttid såfremt nedbrydning negligeres. (GEUS, 2011)

Kalkdominerende geologi, boring 34. 1743

Hvis teorien anvendes på boring 34. 1743, se figur 1.17, hvor geologien som tidligere omtalt består af 0,75 m muld og 2,25 m ler og 6,41 m kalk i den umættede zone, hvilket total set giver 9,41 m fra terræn til grundvandsspejl, og det antages, at leren har samme egenskaber som kalk, samt at transport sker med matricens hastighed pga. det overliggende muld lag, kan det beregnes at ændringer i nitratudvaskning vil tage $\frac{9,41 \text{ m}}{0,75 \text{ m}} = 12,5 \text{ år før den er synlig ved grundvandsspejlet. Det stemmer godt overens med, hvad der blev fundet via nitratmålingerne på 14 år.$

På baggrund af dette afsnit kan det konkluderes, at geologien er af stor betydning for responstiden for ændringer i nitratkoncentrationerne i grundvandet i forhold til en ændring i arealanvendelsen.

1.4 Projektets hypotese og afgrænsning

Store dele af indvindingsoplandet til Drastrup kildepladser har i mange årtier frem til ca. år 2000 været dyrket landbrugsarealer, hvorved jorden er blevet tilført en stor mængde nitrat. Dette har resulteret i et stort nitratoverskud, som er blevet udvasket til grundvandsmagasinet. Til trods for en begyndende arealanvendelsesomlægning i midten af 1980'erne er nitratkoncentrationerne i mange boringer nær kildepladserne, hvor geologien består af kalk, fortsat konstante eller stigende.

I kalken findes høje hydrauliske ledningsevner, hvilket kombineret med lave effektive porøsiteter introducerer små opholdstider for opløste stoffer i sprækker ved selv små trykgradienter. Den diffusive transport i sprækkerne sker, i modsætning til den advektive transport, særdeles langsom. I matricen, bestående af porer mindre end 30μ m, er den advektive transport langsom til ikke forekommende, hvorfor den diffusive transport er dominerende i matricen. Udvekslingen mellem disse to faser sker ved diffusion.

Årsagen til, at effekten af arealanvendelsesomlægningen fortsat ikke er synlig på målte nitratkoncentrationer i kalkmagasinet, til trods for små opholdstider i sprækker, må således skyldes, at der forekommer en tilbageholdelse ved udvekslingen af stof imellem sprækker og matrice. Ud fra denne betragtning opstilles projektets hypotese:

Årsagen til den manglende synlige effekt på målte nitratkoncentrationer i grundvandsmagasinet på trods af en ændret arealanvendelse skyldes, at geologien i oplandet hovedsageligt består af opsprækket kalk.

Til at besvare ovenstående hypotese opstilles tre arbejdsspørgsmål:

- Hvilken indflydelse har skalaen på bestemmelse af parametre til numerisk modellering af grundvandsindvindingen i Drastrup?
- Hvilke parametre har den primære effekt på stoftransporten i et dobbelt porøsitet medie?
- Hvornår forventes effekten af arealanvendelsesomlægningen at være synlig i Drastrup, og hvornår vil nitratkoncentrationen være under grænseværdien i grundvandsmagasinet?

For at verificere hypotesen er det nødvendigt at bestemme, hvorledes vand- og stoftransporten foregår i kalk. Dette gøres ved at analysere kalkens hydrogeologiske og stoftransport egenskaber ved forsøg på skalaer: lille skala (5 cm, intakte prøver), mellem skala (60 cm, intakt prøve) og stor skala (push-pull forsøg med influensradius på flere meter). Kalkens hydrogeologiske og stoftransport egenskaber bestemmes herudfra for oplandet til Drastrup kildepladserne. Ud fra de foretagede forsøg, samt den teoretiske forståelse for et dobbelt porøst medie, opstilles en tredimensional grundvandsmodel, som beregner stoftransporten, og dermed tidshorisonten for, hvornår effekten af arealanvendelsesomlægning moniteres. På figur 1.18 ses en oversigt over rapportens struktur.



Figur 1.18: Oversigt over rapportens struktur.

I forbindelse med bestemmelse af de hydrogeologiske og stoftransport parametre for kalk afgrænses der til at undersøge parametre for klorid i den mættede zone. De bestemte parametre oversættes til egenskaber for nitrat. Den største forskel på klorid og nitrat er, at det er muligt at nedbryde nitrat. Grundet tidsbegrænsning i projektet samt begrænset viden om nedbrydningspotentialet for nitrat er det valgt at negligere potentialet for nedbrydning.

Introduktion til forsøg

For at kunne verificere dette projekts hypotese, er det nødvendigt at karakterisere kalkens evne til at transportere vand og nitrat. De kommende tre kapitler har således fokus på bestemmelse af parametre til brug ved en grundvandsmodellering af Drastrup. Til bestemmelse af parametrene udføres tre strømningsforsøg, hvoraf to forsøg ligeledes er stoftransportforsøg. I dette kapitel introduceres de tre udførte forsøg og hensigten med disse. I kapitel 6 laves en sammenligning af de bestemte parametre fra forsøgene, og de holdes op imod anden litteratur.

For at undersøge kalks evne til at transportere vand og nitrat, er det valgt at udføre tre forsøg:

- 1. Strømningsforsøg på lille skala
- 2. Strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala
- 3. Strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala

Der udføres forsøg på tre skalaer for at undersøge, om parameterbestemmelsen afhænger af denne. Sprækkestrukturen i kalken kan karakteriseres ved tre typer sprækker: Små, mellem og store. Mængden og relevansen af disse varierer med skalaen, og det er således vigtigt at få en forståelse for disse for at kunne vurdere transporten af nitrat i Drastrup. Ved stigende skala stiger troværdigheden mht. bestemmelse af kalkens egenskaber, da sandsynligheden, for at alle størrelser af sprækker er repræsenteret ved en korrekt fordeling, er større.

Figur 2.1 viser en principskitse over de forskellige udførte forsøgs skalaer, samt de fem parametre, som vurderes at have den vigtigste betydning for strømninger og stoftransport i kalk.



Figur 2.1: Principskitse over skalaen for forsøg. Forsøgene på hhv. lille og mellem skala udføres på kalk fra over gvs, forsøget på stor skala udføres på kalk under gvs. (Aalborg Universitet, 2004)

Forsøgene udføres på forskellig vis og på forskellige lokaliteter. For at give læseren et bedre overblik, gives nedenfor en kort gennemgang af forsøgets formål, metode samt forventede resultat.

1. Strømningsforsøg på lille skala

For at få en fornemmelse af kalkens egenskab til lede væske samt få en forståelse for strømningsparametrenes størrelsesorden udføres et strømningsforsøg på lille skala. Strømningsforsøget udføres på cylindriske intaktprøver med en højde og diameter på ca. 5 cm. Grundet prøvernes størrelse er det nødvendigt, at der udføres mange forsøg for at få et fuldstændigt billede af parametrenes variation, da kalk er et heterogent materiale. Det er imidlertid i dette projekt valgt at udføre forsøg på seks intakte prøver, som benyttes til at give et indblik i størrelsesordenen af de respektive parametre.

Forsøget udføres ved at sætte hver prøve under 5,1 m vandtryk og måle flowet gennem prøven. Vha. Darcys formel kan en hydraulisk ledningsevne for prøven bestemmes. Ydermere bestemmes prøvernes total porøsitet ud fra den tørre og vandmættede vægt.

Ved udførelse at et forsøg på lille skala er den hydrauliske ledningsevne stærkt afhængig af mængden og størrelsen af sprækker. Ved at udføre et forsøg på en større skala mindskes variation i antallet og størrelsen af sprækkerne, hvorved parameterbestemmelsen kommer til at svare til en middelværdi for, hvad den er virkeligheden.

2. Strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala

Forsøget på mellem skala har til hovedformål at beskrive stoftransporten i kalk. Forsøget udføres på en kalkblok med størrelsen (længde, bredde, højde) = (61 cm, 34 cm, 40 cm), hvorved det forventes, at både små og mellem sprækkestørrelser er repræsenterede. Da det er en tidskrævende proces at udtage en intakt prøve af denne størrelse, udføres der kun forsøg på én blok. På denne blok udføres der i alt fire stoftransportforsøg samt et forsøg med farvestof. Stoftransportforsøgene giver indblik i interaktionen mellem sprækker og matrice, og farvestof forsøget giver information om, hvilke sprækkestørrelser og afstande som findes i blokken, hvorved der fås en fornemmelse af, hvor stort et overfladeareal i sprækkerne, som er aktivt for diffusion mellem sprækker og matrice.

Forsøget udføres ved at opstille et kar med væske i hver ende af kalkblokken og sende stof igennem blokken grundet en trykgradient. Ved at måle koncentrationen på begge sider af blokken kendes randbetingelserne for stoftransporten.

Forsøget modelleres med tre forsimplede metoder af den fuldt dynamiske model, da denne både er tids- og udstyrskrævende, hvorfor det er ønskværdigt at finde en mindre krævende metode. To af de forsimplede metoder beskriver stoftransporten ved at sætte udvekslingen mellem sprækker og matrice ækvivalent til en sorptionsproces, og den sidste forsimplede metode er en dobbelt porøsitets model, hvor udvekslingen beskrives via en mass transfer koefficient, som er konstant i tid og sted.

3. Strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala

For at beskrive stoftransporten korrekt på stor skala i Drastrup er de hydrogeologiske parametre essentielle. Ved at udføre et sporstofforsøg på stor skala forventes alle typer sprækker at være inddraget. Det er således ikke blot de små og mellem sprækker, der giver et bidrag til den effektive porøsitet. Forsøget på stor skala udføres som et sporstofforsøg, hvor samme boring benyttes til at injicere og tilbagepumpe stoffet. Ved modellering af forsøget i GMS kan den hydrauliske ledningsevne samt effektive porøsitet bestemmes.

Forsøgenes lokalitet

Forsøgene på lille og mellem skala udføres på intakt kalk udtaget fra Mjels Kalkbrud, da der her er kalk ved terræn, som er let tilgængeligt. Forsøget på stor skala udføres derimod nær Drastrup kildeplads 1. Afstanden mellem Mjels og Drastrup er ca. 11 km. Mortensen og Lorenzen (1999) har
lavet en sammenligning af kalkens egenskaber fra Mjels og Ferslev, se figur 2.2 for placering. Ved denne undersøgelse blev det fundet, at kalken for de to lokaliteter har lignende egenskaber. På denne baggrund samt, at de to lokalitet, Mjels og Drastrup, har lignende geologiske forhold, vurderes det, at kalken fra Mjels og Drastrup er sammenlignelig, hvorved det er muligt at sammenligne resultaterne fra alle tre forsøg og benytte resultaterne til at beskrive kalkens egenskaber i Drastrup.



Figur 2.2: Placering af Mjels Kalkbrud, Drastrup og Ferslev.

Sammenfatning

De tre præsenterede forsøg har således til formål at bestemme hydrogeologiske og stoftransport parametre, som har størst betydning for strømninger og stoftransport i kalk. Forsøget på lille skala har til formål at give et estimat på størrelsesordenen af parametrene, forsøget på mellem skala har til formål at undersøge effekten af udvekslingen af stof imellem sprækker og matrice, og forsøget på stor skala har primær fokus på parameterbestemmelsen i Drastrup. I tabel 2.1 ses de bestemte parametre ved hvert forsøg.

Bestemte		Skala	
parametre	Lille	Mellem	Stor
Ks	х	Х	х
$\frac{K_h}{K_v}$	х	-	-
θ_{total}	х	(x)	-
θ_{eff}	(x)	х	х
θ_{im}	(x)	(x)	-
τ_D	-	Х	(x)
ζ	-	Х	-

Tabel 2.1:	De ønskede bestemte parametre på hver skala. x er parametre som bestemmes, (x) er
	parametre som ikke bestemmes direkte, men der gives et estimat på baggrund af forsøget,
	og - er ikke bestemte parametre ved det pågældende forsøg.



Ved strømningsforsøget på lille skala undersøges det, hvorledes vand transporteres over 5 cm i Drastrup i både den horisontale og vertikale retning, se figur 3.1 for illustration. Det gøres med udgangspunkt i små intakte prøver med længde og diameter på 5 cm udtaget fra Mjels Kalkbrud. Ved at transportere vand igennem prøverne kan de hydrogeologiske parametre, hydraulisk ledningsevne og total porøsitet, bestemmes.



Figur 3.1: Formålet med strømningsforsøget på lille skala er at undersøge, hvorledes vand transporteres i den mættede zone over 5 cm i den horisontale og vertikale retning.

3.1 Forsøgets formål

For at få forståelse af kalkens evne til at lede en væske, ønskes den mættede hydrauliske ledningsevne bestemt. Det forventes, at den hydrauliske ledningsevne vil variere meget forsøgene imellem, da den hydrauliske ledningsevne vil være afhængig af, om den aktuelle prøve indeholder sprækker og størrelsen af disse. Det er således muligt, at nogle prøvers hydrauliske ledningsevne vil være et udtryk for matricens hydrauliske ledningsevne og at andre prøvers hydrauliske ledningsevne til være for sprækket kalk. Da der udføres forsøg på prøver som udtages hhv. horisontalt og vertikalt er der muligt at bestemme anisotropien for kalken. Ydermere bestemmes totalporøsiteten. Tabel 3.1 viser illustrativt parametrene, der ønskes bestemt ved forsøget på lille skala.

Tabel 3.1: De ønskede bestemte parametre på lille skala. x er parametre som bestemmes, (x) er parametre som ikke bestemmes direkte, men der gives et estimat på baggrund af forsøget, og - er ikke bestemte parametre ved det pågældende forsøg.

Bestemte	Skala
parametre	Lille
K_s	х
$\frac{K_h}{K_v}$	x
θ_{total}	х
θ_{eff}	(x)
θ_{im}	(x)
τ_D	-
ζ	-

Grundet kalkens dobbelt porøsitet og den primære transport foregår i sprækkerne, er det nødvendigt at bestemme parametrene på intakte prøver. Da det kun ønskes at få viden om størrelsesordenen på parametrene, udføres der i alt kun seks forsøg.

Der skelnes i dette kapitel mellem fragment og prøve. Et fragment er en større kalkklump, som udtages i Mjels Kalkbrud. Af fragmenterne udtages efterfølgende mindre prøver til strømningsforsøget. Prøverne navngives "*Fragment nummer (1-9), Prøve notering (a-c)*", eksempelvis 2b.

3.2 Forsøgets udførelse

Udførelsen af strømningsforsøget er opdelt i to undersektioner omhandlende, hvorledes den mættede hydrauliske ledningsevne og total porøsitet bestemmes for de små intakte prøver. I appendiks C findes information om, hvorledes de små intakte prøver er blevet udtaget fra Mjels Kalkbrud, samt hvordan disse monteres i stålcylindre.

Mættet hydraulisk ledningsevne

En intakt prøve isættes forsøgsopstillingen vist på figur 3.2. Ved at benytte en pumpe udsættes prøven for vakuum for at vandmætte prøven. Når prøven vurderes til at være vandmættet slukkes pumpen, og en beholder med vand hæves til 5,1 m over udløb, hvilket giver en prædefineret trykforskel. Hernæst måles, hvor stor en mængde vand, der passerer prøven over en given tid. Dette kan således omregnes til et flow, som igen kan omregnes til en mættet hydraulisk ledningsevne vha. en omskrivning af Darcys formel, ligning (3.1).

$$K_s = \frac{Q}{A} \frac{dh}{dl} \tag{3.1}$$

Før forsøgene igangsættes kontrolleres det, at forsøgsopstillingen er tæt, således prøverne ikke kan trække luft ind i forbindelse med vandmætningen. Dette kontrolleres ved, at trykket ikke må falde i systemet over en tidsperiode. Der er fundet et tryktab svarende til ca. $0,5 \frac{kPa}{t}$, men da det er konstateret at tryktabet forekommer efter prøven, vil dette ikke påvirke vandmætningen.





Målebæger

Figur 3.2: Forsøgsopstilling til strømningsforsøg.

Porøsiteter

Før strømningsforsøget igangsættes vejes den respektive prøve. Denne vægt kan benyttes til at bestemme kalkens vandindhold ved mark kapacitet, hvor porer større end ca. 30μ m er drænet, se figur 1.16 på side 30 for kalks retentionskurve. Efter forsøget er prøven tilnærmelsesvis vandmættet, denne vægt noteres. Herefter opvarmes prøven ved 400 °C i 72 timer, og vejes derefter, hvorved prøvens tørvægt haves. Prøven opvarmes til 400 °C for at sikre at vandet i de mindste porer fordamper. Ud fra prøvens vandmættede og tørre vægt kan prøvens mættede vandindhold bestemmes. Denne forventes at være lidt mindre end den egentlige totale porøsitet, da prøverne ikke vandmættes fuldstændigt.

3.3 Antagelser

I forbindelse med udførelsen af forsøget er følgende antaget:

1. Intakte prøver

Til trods for at prøven påvirkes af et stort vandtryk antages det, at prøvens sprækker ikke eroderes, og således forbliver intakt under hele forsøget.

2. Konstant trykforskel

Trykforskellen antages at være konstant, selvom noget af vandet i beholderen transporteres igennem prøven. Da vandspejlet i beholderen kun falder få centimeter i forhold til den samlede trykhøjde på 5,10m antages dette ikke at påvirke det endelige resultat.

3. Negligeret hastighedshøjden

Det antages, at hastighedshøjden kan negligeres, se ligning (3.2). Dette gøres på baggrund af, at transporten foregår langsomt.

$$h_1 - h_2 = z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{\nu_1^2}{2g} - z_2 - \frac{\rho_2}{\gamma} - \frac{\nu_2^2}{2g}$$

$$= z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} - z_2 - \frac{\rho_2}{\gamma}$$
(3.2)

4. Konstant temperatur

Temperaturen antages konstant til 20 °C. Temperaturen har en påvirkning på vandets viskositet og densitet, som vil påvirke den hydrauliske ledningsevne.

5. Negligerede randeffekter

Ved udtagelsen af prøven slibes prøven til, således cylinderen kan monteres. Ved monteringen kan prøven dog slibes en anelse for lille, hvorfor kanten fyldes med opslæmmet kalk for at mindske randeffekter. Ydermere sidder prøverne så godt fast i cylinderen, at de ikke kan presses ud. Det antages derfor, at randeffekten er lille.

3.4 Resultater

Resultatbeskrivelsen omfatter bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne og porøsiteter. Resultaterne for den hydrauliske ledningsevne og totalporøsiteten sammenholdes i kapitel 6 med resultaterne fra strømnings- og stoftransportforsøg på mellem og stor skala samt med anden litteratur.

I tabel 3.2 ses resultaterne af forsøgene. Beregninger findes i bilag E.3.1.

Prøve Orientering	Orientarina	Hydraulisk	Total	Vandindhold
	Orientering	ledningsevne	porøsitet	ved pF ≈ 2
[#]		$\left[\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}\right]$	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{vand}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$
Test	Ukendt	$8,09 \cdot 10^{-4}$	0,46	-
2a	Horisontal (N)	$5,\!48 \cdot 10^{-4}$	0,45	0,44
3b	Horisontal (N)	$2,90 \cdot 10^{-2}$	0,43	-
3c	Vertikal	$3,20 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,40
4a	Vertikal	$2,28\cdot10^{-4}$	0,43	0,42
4b	Horisontal (N-NØ)	$5,17 \cdot 10^{-3}$	0,43	-
9b	Horisontal (N-NØ)	$3,04 \cdot 10^{-4}$	0,45	-
	Middelværdi:	$5,20 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,42

Tabel 3.2: Resultater fra strømningsforsøg på lille skala.

Mættet hydraulisk ledningsevne

Den mættede hydrauliske ledningsevne er for de horisontale prøver fundet til at ligge i intervallet $3,04 \cdot 10^{-4} - 2,90 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ og for de vertikale prøver til $2,28 \cdot 10^{-4} - 3,20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Den bestemte størrelsesorden for den hydrauliske ledningsevne synes høj. Årsagen her til kan være, at alle prøverne har indeholdt sprækker, og at disse har været gennemgående i prøven. Ydermere er variation for de bestemte intervaller af den hydrauliske ledningsevne lille, hvilket tyder på, at alle prøver har indeholdt et sprækkesystem, og at dette har haft samme karakter. Dog med undtagelse af prøve 3b, hvor ledningsevne er 1 til 2 dekader højere end de resterende, hvilket kan skyldes, at der er observeret en synlig stor sprække i prøven.

Udtagelsen af de intakte prøver har været yderst kompliceret. Det er forsøgt at udtage i omegnen af 15 prøver, hvor kun 7 (inkl. test-forsøget) har lykkedes. Det er observeret, at prøverne har en tendens til at flække ved sprækkerne i forbindelse med montering af stålcylinder, hvorved prøver med synligt store sprækker ikke repræsenteres. Ydermere er det fundet, at forsøgsprøverne alle har en høj hydraulisk ledningsevne, hvorved ingen af prøverne repræsenterer kalkmatricens hydrauliske ledningsevne. Strømningsforsøget på lille skala repræsenterer derfor ikke det mulige interval for den mættede hydrauliske ledningsevner i felten, men det giver et godt fingerpeg af, dens størrelsesorden og hvilken indflydelse skalaen har på de bestemte parametre.

Anisotropi, $\frac{K_h}{K_v}$

De ovenstående hydrauliske ledningsevner udtrykker også anisotropien i kalken. Anisotropien ligger i intervallet 1 - 127. Variationen i anisotropifaktoren skyldes, at prøve 3b har indeholdt en synlig stor sprække.

Porøsiteten

Totalporøsiteten, bestemt ved tørring af prøverne, ligger i intervallet 0,43 - 0,46 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ med en middelværdi på 0,44 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Sammenholdes dette med det tidligere præsenterede interval for totalporøsiteten på 0,30 - 0,45 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ses det, at de bestemt total porøsiteter ligger i den høje ende af intervallet.

Porøsiteten bestemt ved mark kapacitet ligger i intervallet $0,40 - 0,44 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Såfremt det antages, at hele matricen er vandmættet må den resterende del af totalporøsiteten tilskrives sprækker. Ved denne betragtning kan porøsiteten bestemt ved mark kapacitet sidestilles med den immobile porøsitet. Den effektive porøsitet må således ligge i intervallet $0,01 - 0,03 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Da det er usikkert, hvor tørret prøverne har været, er det således også usikkert, om det præcist er ved pF = 2 eller større, at porøsiteten er blevet bestemt. Det vurderes derfor, at værdien ikke er tilstrækkelig præcist bestemt til at opgive denne som en effektiv porøsitet. Det vurderes dog, at den ligger i intervallet $0,01 - 0,05 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$.

3.5 Sammenfatning

På baggrund af det udførte forsøg kan det vurderes, at vandtransporten er stærkt afhængig af forholdet mellem sprækker og matrice. Af seks intaktprøver findes den hydrauliske ledningsevne til at variere i intervallet $2,28 \cdot 10^{-4}$ til $2,90 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Intervallet vurderes til at være smalt, da hydrauliske ledningsevner for kalkmatricer kan være ned til $10^{-9} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ jf. tabel 1.2 på side 26. Intervallet viser dog sprækkesystemets betydning, da store sprækker medfører høje transporthastigheder. Endvidere bestemmes en middel total porøsitet til $0,44 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$.

Strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala

I dette kapitel undersøges det, hvorledes det er muligt at beskrive strømning og stoftransport i Drastrup områdets kalklag i den mættede zone. Det gøres med udgangspunkt i et endimensionalt strømnings- og stoftransportforsøg på en kalkblok med en længde på ca. 60 cm, hvor længden er bestemt ud fra, hvad der har været praktisk muligt at udtage. Der injiceres et stof med koncentrationen C_0 , og i en afstand fra injektionspunktet på 60 cm måles koncentrationen af stoffet, C(t). Det beskrives herudfra, hvorledes stof bliver transporteret i enten den vertikale eller horisontale retning over 60 cm i Drastrup. Dette er illustreret på figur 4.1.



Figur 4.1: Formålet med at udføre et strømnings- og stoftransportforsøg på en kalkblok er at blive i stand til at beskrive stoftransporten over 60 cm i Drastrup. C_0 er en introduceret start koncentration, og C(t) er stoffets gennembrudskurve efter 60 cm transport.

4.1 Forsøgets formål

Formålet med at lave et forsøg på en kalkblok er at få bedre indsigt i stoftransportprocesserne, hvilket kan opnås ved at have stoftransporten i kalk under kontrollerede forhold. Dette vil sige, at en del af parametrene er kendte, hvorved det er lettere at få et godt kendskab til de ukendte og usikre parametre, som har betydning for stoftransporten. Parametrene, som bestemmes ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala, er listet i tabel 4.1.

Bestemte	Skala
parametre	Mellem
Ks	X
$\frac{K_h}{K_v}$	-
θ_{total}	(x)
θ_{eff}	x
θ_{im}	(x)
$ au_D$	x
ζ	x

Tabel 4.1: De ønskede bestemte parametre på mellem skala. x er parametre som bestemmes, (x) er parametre som ikke bestemmes direkte, men der gives et estimat på baggrund af forsøget, og - er ikke bestemte parametre ved det pågældende forsøg.

Der udføres to forsøg; et forsøg med et ikke-reaktivt stof og et forsøg med farvestof.

(a) Forsøg med et ikke-reaktivt stof (stoftransportforsøg)

Ved at lave forsøg med et ikke-reaktivt stof elimineres nedbrydningen og sorption af stoffet. I dette tilfælde er det valgt at bruge natriumklorid (NaCl). Der haves herved tre tilbageværende stoftransportprocesser: Advektion, dispersion og diffusion. Heraf forekommer diffusionen både i vandet i faserne (sprække og matrice) og som udveksling mellem de to faser.

Advektion: Her haves den hydrauliske gradient, flow, dimensioner for kalkblokken og gennembrudskurver, som kendte parametre. Herudfra er det muligt at bestemme den mættede hydrauliske ledningsevne, Darcy hastigheden, den effektive porøsitet og porevandshastigheden.

Dispersion: Dispersionskoefficienten bestemmes ud fra forsøgenes gennembrudskurver.

Diffusion: Diffusionen af stof fra sprækker til matrice og modsat, kan ses som en tilbageholdelse af stof afhængig af koncentrationsgradienten mellem de to faser. For at få en fornemmelse af dynamikken i udvekslingen af stof mellem de to faser (sprækker og matrice) laves fire forsøg. De fire forsøg illustreres på figur 4.2.

- 1. Forsøg: Forsøg med klorid uden en præforurening.
- 2. Forsøg: Forsøg med postevand, hvor kalkblokken forsøges skyllet ren for klorid.
- 3. Forsøg: Forsøg med klorid med en præforurening fra tidligere forsøg, da alt kloriden ikke skylles ud af kalkblokken.
- 4. Forsøg: Forsøg med postevand. Kalkblokken forsøges igen skyllet ren for klorid.

Ved forsøg 1 forventes det, at kalkmatricen er mere modtagelig over for kloriden end ved forsøg 3, da kalkmatricen ikke indeholder klorid ved start af forsøg 1, hvilket vil give udslag i forskellige gennembrudskurver.

(b) Forsøg med farvestof

Farvestoffet brilliant blå sendes igennem kalkblokken, hvorved sprækkerne markeres, hvilket muliggør at måle afstanden mellem sprækkerne. Herved opnås en bedre forståelse af sprækkesystemet i kalken.



Figur 4.2: Forsøg 1 til 4. Ved forsøg 1 tilføres klorid (grøn farve), som diffunderer ind i matricen. Ved forsøg 2 tilføres rent vand for at renskylle matricen (hvid farve). Forsøgene gentages som forsøg 3 og 4.

4.2 Forsøgsopstilling

På figur 4.3 og 4.4 ses forsøgsopstillingen, som i forenklet form består af en tønde på ca. 100 L, en pumpe med en ydeevne på ca. 1 $\frac{m^3}{t}$, en kalkblok af størrelsen (længde, bredde, højde) = (61 cm, 34 cm, 40 cm) og et kar på hver side af kalkblokken af ca. 15 L.



Figur 4.3: Skitse af forsøgsopstilling til strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala.



Figur 4.4: Forsøgsopstilling for strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala.

Tønden benyttes til at opbevare postevand eller klorid, således koncentrationen og vandstanden i kar 1 opretholdes konstant. Dette sikres ved cirkulation af væsken mellem tønde og kar 1 via en pumpe, se figur 4.5. Pumpen pumper væske fra tønden til kar 1. På siden af kar 1 er der påsat et stigrør, som kan regulere vandstanden i karet, herved kan trykniveauet reguleres. Når væsken i kar 1 har opnået højden, som stigrøret er sat til, løber væsken tilbage i tønden grundet niveauforskel. I dette tilfælde er trykniveauet sat til knap 32 cm, da kalkblokken har pådraget sig mange sprækker i de øverste centimeter under udtagelsen. I appendiks D findes en beskrivelse af udtagelsesprocessen af kalkblokken.



Figur 4.5: Cirkulation af væske mellem tønde og kar 1 via pumpe og stigrør.

På siden af kar 2 er der ligeledes påsat et stigrør for at opretholde et ønsket trykniveau, se figur 4.6. Hvis trykniveauet er lavere i kar 2 end i kar 1, opnås en transport af væske fra kar 1 til kar 2. Fra kar 2 løber væsken ud i en spand, som tømmes til afløb. Trykniveauet er sat til ca. 30,5 cm i kar 2, hvilket introducerer en gradient imellem de to kar.



Figur 4.6: Stigrør på kar 2, som leder vand ud i en spand.

For at sikre tilstrækkelig opblanding af væske forsynes alle væskebeholdere (tønde, kar 1 og kar 2) med indblæsning af luft i bunden. Ydermere suger pumpen fra tøndens bund og stigrøret på siden af kar 1 udleder væske i toppen af tønden.

I kar 2 er en elektrisk ledningsevne måler (EC-meter) opsat. Denne måler kontinuert en elektrisk ledningsevne i væsken, som er relateret til en kloridkoncentration. Grundet denne måler kan forekomme ustabil, måles der også manuelt med et andet EC-meter ("manuelt EC-meter"), og der udtages løbende vandprøver af 50mL til analyse med en "Chloride Ion Selctive Electrode"(elektrode).

4.3 Forsøgets udførelse

I dette afsnit beskrives forsøgets udførelse.

1. Vandmætning af kalkblok

Efter forsøget er blevet stillet op, fyldes tønden med postevand. Vandet transporteres gennem kalkblokken og ud ved kar 2. Således vandmættes kalkblokken forinden stoftransportforsøget påbegyndes. Herved haves samme udgangspunkt som i den mættede zone før forurening i Drastrup. Vandmætning foretages i en uge, hvilket formentligt ikke er tilstrækkelig til at vandmætte de mindste sprækker i kalkblokken, da en uge ikke var tilstrækkelig til at vandmætte de små intakte prøver ved strømningsforsøget på lille skala. Dette vurderes dog, at dette vil være uden betydning for vand- og stoftransporten ved forsøget.

2. Standardkurver for ledningsevnemåler

I perioden, hvor kalkblokken vandmættes, kontrolleres det, at ledningsevnemålerne fungerer, og der udformes standardkurver ud fra en serie af standarder. For flere detaljer omkring ledningsmålernes standardkurver se appendiks E. Løbende under forsøgene kontrolleres, at EC-metrene fungerer optimalt, og der laves nye standardkurver, hvis EC-metrene ikke passer med de hidtidige kurver.

3. Opblanding af natriumklorid i tønden

Før det første stoftransportforsøg med klorid kan igangsættes, fyldes tønden med saltvand i form af natriumklorid. For at sikre, at saltet er opblandet i det demineraliserede vand i tønden, doseres salt og vand i en spand under omrøring, hvorefter saltvandet hældes over i tønden. For at undgå uhensigtsmæssige strømninger i kalkblokken grundet densitetsforskelle må saltvandskoncentrationen ikke være for høj. Der ønskes dog stadig en synlig og målbar effekt, hvorfor koncentrationen heller ikke må være for lav. På denne baggrund er det valgt at sætte koncentrationen i tønden til ca. 10000 ppm Cl⁻, hvorved der skal bruges $16,5 \frac{g \text{ NaCl}}{L \text{ demineraliseret vand}}$. I forbindelse med opfyldningen af tønden, sættes pumpen til at cirkulere saltvandet i tønden, således opblanding opretholdes. Når tønden er fyldt, tømmes kar 1 for postevand og pumpen sættes til at pumpe saltvand over i kar 1. Det første stoftransportforsøg er herved igangsat.

4. Forsøg 1: Første forsøg med klorid

Start den 16-11-2011 kl. 14:35

Slut den 07-12-2011 kl. 14:00

I forbindelse med forsøget foretages flowmålinger. Dette gøres ved, at veje mængden af saltvand, som kommer ud fra stigrøret ved kar 2, over en given tidsperiode. Lignende flowmålinger udføres for forsøg 2, 3 og 4.

5. Forsøg 2: Første forsøg med postevand

Tønden og kar 1 tømmes for saltvand. Tønden skylles grundigt, fyldes med postevand, og pumpen sættes til at fylde kar 1 med postevand. Det første forsøg med postevand er således igangsat.

Start den 07-12-2011 kl. 14:28 Slut den 28-12-2011 kl. 17:30

6. Forsøg 3: Andet forsøg med klorid

Tønden og kar 1 tømmes for postevand. Tønden fyldes med saltvand ligesom ved forsøg 1, og forsøget igangsættes.

Start den 28-12-2011 kl. 17:59 Slut den 18-01-2012 kl. 08:31

- 7. Forsøg 4: Andet forsøg med postevand Tønden og kar 1 tømmes for saltvand. Tønden skylles og fyldes med postevand, hvorefter forsøget igangsættes ligesom ved forsøg 2. Start den 18-01-2012 kl. 08:46 Slut den 08-02-2012 kl. 16:00
- 8. Forsøg med farvestof

Tønden fyldes med ca. 50L postevand og 16g brilliant blå tilsættes under omrøring. Pumpen startes, hvorved farvestoffet pumpes over i kar 1 og sendes igennem kalkblokken. Efter to døgn stoppes forsøget, da den blålige farve er synlig i kar 2. Karrene tømmes for vand, og kassen, som indrammer kalkblokken, pilles fra hinanden, således kalkblokken står frit.

Ved fjernelse af kassen revner kalkblokken flere steder. Det forsøges at save kalkblokken over på tværs ca. 20 cm fra den ene ende. Det findes imidlertid ikke muligt, da kalkblokken er revnet mange steder. Det vælges i stedet, at fjerne de små blokke styk for styk og herved få et billede af, hvor vandet er blevet transporteret.

4.4 Analyse af måledata

Ud fra målte flow, trykniveauer, dimensioner af kalkblokken og gennembrudskurver, bestemmes den mættede hydrauliske ledningsevne, Darcy hastigheder, effektiv porøsitet og porevandshastigheder.

Mættet hydraulisk ledningsevne og Darcy hastighed

I tabel 4.2 ses parametrene; tværsnitsareal, hydraulisk gradient og flowmålinger, som benyttes til bestemmelse af den mættede hydrauliske ledningsevne og Darcy hastigheden. Tværsnitsarealet bestemmes på baggrund af en middelværdi af vandstanden i hhv. kar 1 og kar 2 samt bredden af kalkblokken. Den hydrauliske gradient bestemmes på baggrund af differencen i vandstandene i karrene og kalkblokkens længde. Flowet er bestemt på baggrund af mængden af vand, der ledes ud fra stigrøret i kar 2 over en given tidsperiode. Der er udført tre til fire flowmålinger ved hvert forsøg. Flowmålingerne findes i bilag E.4.1.

Forsøg	A _{blok}	$\frac{dh}{dl}$	Q		Ks	v
	$\left[\mathrm{cm}^{2}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{cm}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{t}}\right]$	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{cm}{t}\right]$
Forsøg 1						
а	1067	$2,\!13\cdot10^{-2}$	219	9,38	$2,\!61\cdot 10^{-5}$	0,20
b	1067	$2,13 \cdot 10^{-2}$	213	9,37	$2,60 \cdot 10^{-5}$	0,20
с	1067	$2,13 \cdot 10^{-2}$	207	9,14	$2,54 \cdot 10^{-5}$	0,19
Gennemsnit			213	9,30	$2,58 \cdot 10^{-5}$	0,20
Forsøg 2						
а	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	252	9,04	$2{,}51\cdot10^{-5}$	0,24
b	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	255	9,12	$2,\!53\cdot10^{-5}$	0,24
c	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	265	9,48	$2{,}63\cdot10^{-5}$	0,25
d	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	261	9,30	$2,\!58\cdot10^{-5}$	0,24
Gennemsnit			258	9,24	$2,57 \cdot 10^{-5}$	0,24
Forsøg 3						
a	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	267	9,57	$2,\!66\cdot 10^{-5}$	0,25
b	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	254	9,11	$2,\!53\cdot10^{-5}$	0,24
c	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	272	9,74	$2,71 \cdot 10^{-5}$	0,26
d	1065	$2,\!62\cdot 10^{-2}$	267	9,55	$2{,}65\cdot10^{-5}$	0,25
Gennemsnit			265	9,49	$2,64 \cdot 10^{-5}$	0,25
Forsøg 4						
a	1063	$2,46 \cdot 10^{-2}$	241	9,21	$2,56 \cdot 10^{-5}$	0,23
b	1063	$2,\!46\cdot 10^{-2}$	275	10,52	$2,\!92\cdot10^{-5}$	0,26
c	1063	$2,46 \cdot 10^{-2}$	232	8,88	$2,\!47\cdot 10^{-5}$	0,22
Gennemsnit			249	9,54	$2,65 \cdot 10^{-5}$	0,23

Tabel 4.2: Bestemt tværsnitsareal, hydraulisk gradient og flowmålinger for de fire forsøg på kalkblokken, herudfra er kalkblokkens mættede hydrauliske ledningsevne og Darcy hastigheden bestemt.

Ud fra tabelværdierne ses det, at den mættede hydrauliske ledningsevne er fundet ens fra forsøg til forsøg. Herved kan blokkens middel mættede hydrauliske ledningsevne bestemmes til $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ svarende til $9,3 \frac{\text{cm}}{\text{t}}$.

Ved bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne er der usikkerheder. Trykniveauerne i kar 1 og 2 er målt med en lineal, målinger bliver således afhængig af, om linealen er placeret samme sted. Ydermere er selve aflæsningen usikker, da den afhænger af, hvilken vinkel personen aflæser fra. Ud fra disse betragtninger er det vurderet, at der er en usikkerhed på $\pm 3 \text{ mm}$ på de målte trykniveauer i karrene. Ved flowmålinger er der usikkerhed på tidsperioden, da start- og sluttidspunkt kun præciseres med timer og minutter. Der er således en usikkerhed på to minutter. Ved afvejningen af den gennemstrømmende væske i tidsperioden, er det sket at udtagninger af vandprøver til analysering med elektroden er foretaget i samme periode, som hvor en flowmåling har været i gang. Der er herved udtaget 50 mL, som ikke har været med på vægten, men blot er blevet lagt til den afvejede mængde. På denne baggrund er der vurderet en usikkerhed for den afvejede mængde væske på $\pm 50 \text{ g}$. Ud fra disse usikkerhedsbetragtninger kan det beregnes af den mættede hydrauliske ledningsevne skyldes primært usikkerhed nilknyttet målte trykniveauer. Udregning af usikkerhederne på bestemte hydrauliske ledningsevne findes i bilag E.4.2.

Det bemærkes, at Darcy hastigheden varierer lidt mellem forsøgene. Dette skyldes en ændring i den hydrauliske gradient. Årsagen til, at den hydrauliske gradient er blevet ændret, er at kar 1 skulle tømmes for vand mellem forsøgene.

Effektiv porøsitet og porevandshastigheder

På figur 4.8 ses målte kloridkoncentrationer i hhv. kar 1 og kar 2 med elektroden. Da målinger fra det kontinuerte EC-meter forekommer ustabilt, og da måledata fra det manuelle EC-meter samt elektroden stemmer overens, er det valgt at benytte målingerne med elektroden.

Da kar 2 indeholder 15,3L væske, og flowet gennem karet under alle forsøgene har været ca. $0,2\frac{L}{t}$, er den målte koncentration i kar 2 fortyndet i forhold til, hvad der bliver transporteret gennem kalkblokken. Dette korrigeres der for ved at opstille en simpel boks betragtning, se ligning (4.1). Boksbetragtningen er illustrativt vist på figur 4.7. Da små spring i den målte koncentration i kar 2 medfører store spring i de korrigerede gennembrudskurver udglattes kurven. Herved opnås den røde graf på figur 4.8. Målte koncentrationer samt korrigering af data findes i bilag E.4.3.

$$V \frac{C_{kar2}^{i+1} - C_{kar2}^{1}}{\Delta t} = Q^{i} C_{kalkblok}^{i} - Q^{i} C_{kar2}^{i}$$

$$\Leftrightarrow C_{kalkblok}^{i} = \frac{V \frac{C_{kar2}^{i+1} - C_{kar2}^{1}}{\Delta t} + Q^{i} C_{kar2}^{i}}{Q^{i}}$$

$$(4.1)$$

$$V = 15,3 L$$

$$Q \leftarrow V = 15,3 L$$

$$Q \leftarrow Q \leftarrow Q$$

Figur 4.7: Boks betragtning for at korrigere for fortynding af koncentrationen.

C_{kar 2} C_{kalkblok}



Figur 4.8: Startkoncentrationer i kar 1, målte koncentrationer i kar 2 og korrigerede koncentrationer for fortyndingen i kar 2 for alle fire forsøg.

For at gøre det lettere at sammenligne gennembrudskurverne for hvert forsøg, spejles gennembrudskurverne for forsøg 2 og 4 omkring x-aksen, og alle kurverne laves relative i forhold til hvert forsøgs start og mulige slut koncentration. Det bemærkes, at den relative gennembrudskurve for forsøg 1 og 3 er relativ til den gennemsnitlige koncentration i kar 1, som ved forsøg 1 har været på 9396 $\frac{\text{mgCl}^-}{\text{L}}$, og ved forsøg 3 har været på 10128 $\frac{\text{mgCl}^-}{\text{L}}$. Herved fremkommer figur 4.9.



Figur 4.9: Sammenligning er de fire forsøgs gennembrudskurver.

Det ses umiddelbart, at kurverne har lignende udformning, en lineær vertikal stigning fra 0% til 10% gennembrud, hvorefter kurverne for forsøg 1, 2 og 4 begynder at bøje af. Da ingen af kurverne når 100% er der således ikke opnået "steady state", hvor matricen ikke længere har indflydelse på forsøget. Gennembrudstiden for 10% af koncentrationen ses i tabel 4.3.

Sammenlignes gennembrudskurver for forsøg 1 og 3 ses det, at 50% gennembruddet for forsøg 1 kommer nogle døgn senere end ved forsøg 3, se tiden for 50% gennembrud i tabel 4.3. Dette skyldes, at matricen ved forsøg 1 ikke indeholder klorid, hvorved matricen er modtagelig for kloriden ved diffusion. Først når randen mellem sprækker og matrice har opnået en given koncentration, tillader kalken en videre transport af klorid. Ved forsøg 1 opbygges der således et "skind"af klorid i randen af sprækkerne. På grund af kloridskindet er koncentrationsgradienten mindsket, og matricen er således ikke lige så tilbøjelig til at tilbageholde klorid ved forsøg 3, hvorved en stor del af kloriden får lov at blive transporteret direkte fra kar 1 til kar 2. Først når sprækkevandet indeholder ca. 50% af startkoncentrationen starter diffusionen mellem sprækker og matrice igen.

Sammenlignes nedbrydningskurverne for forsøg 2 og 4 ses, at kurverne er rimelig ens. Tiden for 50% gennembrud ved forsøg 4 er lidt længere end for forsøg 2. Dette kan skyldes, at kloriden er blevet transporteret længere ind i matricen ved forsøg 4. Ved forsøg 2 har diffusionen ind i matricen kun foregået under forsøg 1, og ved forsøg 4 har diffusionen ind i matricen foregået under både forsøg 1 og 3.

I tabel 4.3 er tiden for 50% gennembrud for alle fire forsøg omregnet til en hastighed, u_{eff} , hvormed 50% af stoffet er gennembrudt. For et enkelt porøst medie beregnes den effektive porøsitet ud fra u_{eff} og v, da der i dette tilfælde haves et dobbelt porøst medie indeholder $T_{50\%}$ -tiden også en retentionsfaktor forårsaget af udveklingen af stof mellem sprække og matrice. Imidlertid har matricen været mættet med klorid ved randen, hvorfor udveklingen ikke har haft betydning for $T_{50\%}$ ved forsøg 3. Ved beregning af den effektive porøsitet ud fra data fra forsøg 3, er det derfor rimeligt at sætte denne porøsitet lig med kalkblokkens egentlige effektive porøsitet. Som det ses i tabellen er kalkblokkens effektive porøsitet herved bestemt til 0,03 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvilket vurderes rimeligt, da den ifølge tabel 1.2 på side 26 burde ligge inden for intervallet 0,01 til 0,05 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Forsøg	$T_{10\%}$	$T_{50\%}$	<i>u_{eff}</i>	v	θ_{eff}
	[t]	[t]	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$
Forsøg 1	4,5	97	0,62	0,20	0,32
Forsøg 2	0,3	44	1,37	0,24	0,18
Forsøg 3	0,0	8	7,60	0,25	0,03
Forsøg 4	0,3	68	0,89	0,23	0,26

Tabel 4.3:	Beregning ag	f effektiv porevandsi	nastighed sam	t effektiv porøsite	t ud fra gennembrudstider.
------------	--------------	-----------------------	---------------	---------------------	----------------------------

Da gennembrudskurven for forsøg 3 fra 0% til 50% forekommer meget vertikalt kan det udelukkes, at dispersionen har haft en betydning ved forsøget. Kurvernes krumning er derved udelukkende forårsaget af udvekslingen af stof mellem sprækker og matrice.

Ækvivalent retentionsfaktor

En simplificeret måde at beskrive udvekslingen af klorid mellem sprækker og matrice er at se udveklingen som en tilbageholdelse af klorid. Udvekslingsprocessen kan hermed beskrives ved en ækvivalent retentionsfaktor. I den resterende del af kapitlet benævnes denne blot retentionsfaktor.

Med tidligere udregnede Darcy hastigheder kan transporttiden for vand bestemmes ved en effektiv porøsitet på $0.03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, disse ses i tabel 4.4. Retentionsfaktoren beregnes efterfølgende ved division af tiden for 50% gennembrud for klorid med transporttiden for vandet. Således beregnes en retentionsfaktor for hvert forsøg, disse er listet i tabel 4.4.

	v	θ_{eff}	Tvand	$T_{50\%}$	R
	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$	[t]	[t]	[-]
Forsøg 1	0,20	0,03	9,2	97	11
Forsøg 2	0,24	0,03	7,6	44	6
Forsøg 3	0,25	0,03	7,3	8	1
Forsøg 4	0,23	0,03	8,0	68	9

Tabel 4.4: Retentionsfaktorer for forsøgene bestemt ud fra transporttider for vand og klorid.

Ud fra retentionsfaktorerne ses en tydelig effekt af opbyggelse af kloridskindet i sprækker fra forsøg 1 til 3, hvor det gås fra at have en tilbageholdelse på en faktor 11 til at stoffet transporteres med vandets hastighed igennem kalken.

Massebalance

Ud fra de målte kloridkoncentrationer i kar 1 og de korrigerede kloridmålinger i kar 2, kan det beregnes, hvor meget masse af klorid der er blevet tilført og strømmet ud af kalkblokken ved hvert af de fire forsøg. Dette er gjort ved at omregne koncentrationen til en masse pr. tid (målte koncentrationer multipliceres med flowet) og efterfølgende integrerer arealet under kurven fra forsøgets starttil sluttidspunkt. Beregningerne findes i bilag E.4.4. De beregnede masser fremgår af tabel 4.5. I tabellen opgives både masser for hele kalkblokkens volumen og for et mindre volumen på 1 x 1 x 61 cm, hvor af den sidst nævnte kaldes en stribe kalk, se figur 4.10 for illustration. Massen for en stribe kalk opgives, da disse masser benyttes i forbindelse med modelleringen af forsøget. Ydermere skal det bemærkes, at kalkblokkens volumen er bestemt ud fra hele kalkblokken, det vil sige både den mættede og umættede zone. Dette skyldes, at størstedelen af kalkens porer er små, hvorved der vil stå et kapilært vandspejl i blokken.



Figur 4.10: Skitse af det benyttede kalkblok volumen i forbindelse med masse beregninger og definition på en stribe kalk.

Tabel 4.5: Massebalance for stoftransporten af klorid i kalkblokken. For hvert forsøg er mængden af klorid som er tilført (ind) og strømmet ud af kalkblokken (ud) beregnet. Differencen mellem ind og ud udgøres af massen, som findes i kalkblokken efter et givent forsøg (Rest i kalkblok). Masserne, Ind, Ud og Rest i kalkblok, er beregnet for både hele kalkblokkens volumen og for en stribe kalk, se figur 4.10 for definition. Efter hhv. forsøg 1 og 3 indeholder porevolumenet en given kloridkoncentration. Hvis det antages, at massen, som er tilbageholdt i kalkblok ved hvert forsøgs sluttidspunkt, findes ved en koncentration lig C_0 , kan et porevolumen beregnes. Disse volumener ses i tabellen som Min. θ_{total} . Efter hhv. forsøg 2 og 4 er sprækkerne skyllet ren for klorid. Den resterende masse må således findes i kalkens matrice. På lignende vis beregnes dette porevolumen, kaldet Min. θ_{im} .

	Masse	Masse	Min.	Min.
	i kalkblok	i stribe kalk	θ_{total}	θ_{im}
	[g]	[mg]	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$
Forsøg 1				
Ind	1027	714		
Ud	719	500		
Rest i kalkblok	308	214	0,37	
Forsøg 2				
Ind	21	15		
Ud	206	143		
Rest i kalkblok	123	86		0,15
Forsøg 3				
Ind	1332	926		
Ud	1117	777		
Rest i kalkblok	338	235	0,38	
Forsøg 4				
Ind	20	14		
Ud	298	207		
Rest i kalkblok	60	42		0,07
Total masse (Ind)	2400	1668		
Total masse (Ud)	2340	1627		
Rest i kalkblok	60	42		

Ud fra tabel 4.5 ses det, at ved forsøg 1's sluttidspunkt, har kalkmatricen tilbageholdt ca. 30% af den tilførte masse. Rest massen i kalkblokken kan omregnes til et porevolumen, se ligning (4.2). Under antagelse af at rest massen i kalkblokken findes ved en koncentration lig koncentrationen i kar 1, C_0 . Dette vil dog ikke forekomme, da kloriden i matricen vil diffundere langsomt ind i matricen, hvorved det stof, som er kommet længst ind i matricen vil findes ved lavere koncentrationer. Den beregnende porøsitet er derfor et udtryk for, hvad porøsiteten mindst kan være. Porøsiteterne er illustreret på figur 4.11.



Figur 4.11: Bestemte porøsiteter ud fra masseberegninger.

Ved forsøg 1 har koncentration i kar 1 været 9396 $\frac{\text{mgCl}^-}{L}$ og kalkblokkens volumen svarer til 88L. Herved kan den mindste totale porøsitet beregnes til 0,37 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Ved forsøg 2 ses det, at kalkmatricen efter 3 uger med renskylning stadig indeholder ca. 40% af summen af massen som sad tilbage i kalkblok efter forsøg 1 samt massen tilført under forsøg 2. Da sprækkerne efter forsøg 2 er skyllet tilnærmelsesvis rene for klorid, må denne masse sidde i kalkmatricen. Ved lignende udregning som ved forsøg 1, kan det findes, at matricens volumen mindst må være $0.15 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Ved forsøg 3 tilbageholdes en lidt mindre mængde klorid end ved forsøg 1 taget i betragtning, at 123 af 338 g sidder i kalkblokken ved start af forsøg 3. Dette stemmer godt overens med, at matricen i forvejen indeholder stof og derfor ikke er lige så modtagelig overfor at tilbageholde mere stof. Ved omregning af rest massen til et porevolumen skal det bemærkes, at startkoncentrationen nu har været 10128 $\frac{\text{mgCl}^-}{\text{L}}$, herved bestemmes en total porøsitet til 0,38 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Ved forsøg 4 kan det ses, at en større andel af massen skylles ud i forhold til ved forsøg 2. Dette giver teoretisk ingen mening, da det må forventes, at denne masse sidder længere inde i matricen, og derved burde tage længere tid at blive skyllet ud.

Generelt findes det ud fra beregninger af totalporøsiteten, at en stor del af porøsiteten har været aktiv under forsøgene. Det vurderes dog, at beregningerne er usikre, da det er usikkert, hvilken betydning den umættede zone har haft, hvorfor de bestemte porøsiteter ikke vægtes så præcist ved modellering af forsøgene.

På figur 4.12 ses, hvorledes kloridmassen opbygges og udvaskes under de fire forsøg, hvis det antages, at disse processer sker lineært. Da udvekslingen af klorid mellem sprækker og matrice er styret af en koncentrationsgradient, vides det, at en lineær sammenhæng ikke er tilfældet. I et reelt tilfælde vil massen have samme form som koncentrationsforløbet igennem kalkblokken. Det antages dog for simplicitetens skyld, at processen sker lineært.



Figur 4.12: Opbyggelse og udvaskning af kloridmasse i kalkblokken ved de fire forsøg under antagelse af opbyggelse og udvaskning forekommer lineær for en stribe kalk.

Sprækkestruktur og -afstand

Efter at have transporteret brilliant blå igennem kalkblokken blev kassen omkring blokken fjernet. Ved fjernelsen kunne det konkluderes, at kassen havde sluttet tæt omkring kalkblokken, og at der derfor ikke har forekommet nogen randtransport, se figur 4.13.



Figur 4.13: Ved fjernelsen af kassen omkring kalkblokken blev det fundet, at der ikke havde forekommet nogen transport langs kassens rande.

Ved forsøget blev det fundet umuligt at save blokken over på tværs pga. de mange revner, som der forekom i blokken. For at få et billede af hvor mange sprækker og afstanden mellem sprækkerne per tværsnitsareal, blev det valgt at fjerne mindre kalkstykker af gangen. På figur 4.14 til 4.19 ses billeder af sprækkestrukturen markeret med blå farve ved forskellige afstande fra kar 2.

På figur 4.14 ses det, at sprækkestrukturen har været rimelig jævnt fordelt over blokkens tværsnit. 10 cm inde i blokken fra kar 2, se figur 4.15, blev der fundet et meget blåt område i toppen af blokken på ca. 3 cm i diameter. I dette område har der således løbet meget vand. På figur 4.16 ca. i midten af kalkblokken fremkommer sprækkestrukturen meget tydeligt som et net. På figur 4.17 ses en hovedsprække som løber vertikalt og deler sig i mindre sprækker horisontalt. På figur 4.18 ses sprækkestrukturen ca. 50 cm fra kar 2. Ved fjernelse af toppen af kalk, se figur 4.19, findes det, at sprækkerne forekommer tilnærmelsesvis som en fladesprække.



Figur 4.14: Sprækkestruktur ca. 5 cm inde i blokken fra kar 2.



Figur 4.15: Sprækkestruktur ca. 10 cm inde i blokken fra kar 2.



Figur 4.16: Sprækkestruktur ca. 30 cm inde i blokken fra kar 2.



Figur 4.17: Sprækkestruktur ca. 40 cm inde i blokken fra kar 2.

4.4 Analyse af måledata



Figur 4.18: Sprækkestruktur ca. 50 cm inde i blokken fra kar 2.



Figur 4.19: Sprækkestruktur ca. 50 cm inde i blokken fra kar 2.

Ud fra denne gennemgang kan det konkluderes, at der findes en jævn fordeling af sprækker som udgør et hovednetsystem. Afstanden mellem disse sprækker vurderes til at være mellem 5 - 10 cm, se figur 4.20.



Figur 4.20: Afstand mellem størstedelen af sprækkerne.

Ud over hovednettet findes der et finere sprækkesystem. Afstanden mellem de fine sprækker ligger i intervallet fra 0,5 - 2 cm, se figur 4.21.



Figur 4.21: Afstanden mellem sprækkerne i det fine sprækkesystem.

4.5 Modellering af forsøg

For at blive i stand til at forudsige stoftransporten i kalken ved Drastrup, ønskes det at modellere de målte gennembrudskurver for klorid.

Hvis transporten af klorid i kalkblokken skal beskrives så korrekt som muligt ved en dobbelt porøsitetsmodel, i forhold til den viden der haves om transporten, skal den beskrives vha. to ligninger. En advektion-dispersions ligning, ligning (4.3), som beskriver stoftransporten i sprækkerne, og ved Ficks anden lov, ligning (4.4) (Spitz og Moreno, 1996), for stoftransporten i matricen. Ydermere påvirker de to systemer hinanden ved en overførelse af masse ved diffusion. Det er således nødvendigt først at løse stoftransporten i sprækker og efterfølgende bestemme stoftransporten i matricen til samme tidsskridt. Der skal derfor løses to ligningssystemer til hvert tidsskridt.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u\frac{\partial C}{\partial x} + D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$
(4.3)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{4.4}$$

Da denne modelbeskrivelse af stoftransporten i kalk er både tids- og udstyrskrævende, ønskes det at beskrive stoftransporten ved simplere metoder. I dette tilfælde er tre forskellige metoder valgt, hvor af en er analytisk og to er numeriske. Metoderne er listet nedenfor:

Metode 1: Analytisk advektion-sorption-dispersions model.

Metode 2: Numerisk advektion-sorption-dispersions model opstillet i GMS.

Metode 3: Numerisk advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet opstillet i GMS.

Forskellen på de tre metoder er, hvorledes metoden beskriver stoftransporten i kalk. Metode 1 og 2 er simple metoder, hvor diffusionen mellem sprækker og matrice blot beskrives som en tilbageholdelse af stof via en retentionsfaktor. Metode 1 er en analytisk løsning til den styrende advektionsorption-dispersions ligning, se ligning (4.5), som i dette tilfælde er endimensional, da forsøget er endimensionalt. (Spitz og Moreno, 1996)

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{indring i magasinering}} = \underbrace{\frac{-u}{R}\frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{Tilbageholdt advektiv ind/ud flow}} + \underbrace{\frac{D}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}_{\text{Tilbageholdt diffusion og dispersion}}$$
(4.5)

Metode 2 bygger på en finite difference model, hvor flowet bestemmes vha. de to ligninger: kontinuitetsligningen og Darcys lov. Modellen opbygges i GMS. Oven på denne flowmodel bygges en stoftransportmodel, som ligeledes bygger på ligning (4.5).

Ved metode 3 udvides detaljegraden af stoftransportmodellen ved metode 2. Dette gøres ved, at modellen har to porøsiteter. En porøsitet for en mobil fase og en porøsitet for en immobil fase, som beskriver transporten i henholdsvis sprækker og matrice. Stoftransporten bliver derved afhængig af en koncentrationsgradient mellem de to faser. Dette system beskrives ved ligning (4.6), som sikrer massebevarelse, og ligning (4.7) som beskriver stoftransporten imellem de to faser. (Zheng og Wang, 1999)

$$\theta_{mo}\frac{\partial C_{mo}}{\partial t} + \theta_{im}\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta_{mo}D_{ij}\frac{\partial C_{mo}}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta_{mo}u_iC_{mo}\right)$$

$$+ q_s C_s - q'_s C_{mo}$$

$$(4.6)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \zeta \left(C_{mo} - C_{im} \right) \tag{4.7}$$

Heraf kan ligning (4.7) sammenlignes med Ficks anden lov, ligning 4.4. Da begge ligninger beskriver en transport af stof fra sprække ind i matricen, er den essentielle forskel, at Ficks anden lov beskriver diffusionen fuldt dynamisk, hvorimod GMS' version kun beskriver en middel overførelse mellem de to faser. Årsagen til at GMS' version kun beskriver en middel overførelse er, at ζ er en konstant. Ved sammenligning af de to ligninger kan det findes at $\zeta = \frac{D_{eff}}{dx^2}$, hvor dx er den halve sprækkeafstand, og den effektive diffusionskoefficient er lig diffusionskoefficienten for klorid i vandmættet kalk, $D_{p,l}$, divideret med andelen af fasen hvor diffusionen foregår, som i dette tilfælde er lig den immobile porøsitet, θ_{im} . Her af har Mortensen og Lorenzen (1999) fundet, at Buckinghams model for bestemmelsen af diffusionskoefficienten for vand i jord stemmer godt overens for, hvad den er i kalk, hvorved $D_{p,l} = D_{0,l} \theta_{im}^2$, hvor $D_{0,l}$ er diffusionskoefficienten for klorid i vand på $2,03 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ (Spitz og Moreno, 1996). Herved kan mass transfer koefficienten bestemmes ved ligning (4.8).

$$\zeta = \frac{D_{0,l}\,\theta_{im}}{dx^2} \tag{4.8}$$

Fordelen ved de to simple modeller, metode 1 og 2, er, at der er færre parametre, som skal kalibreres end ved metode 3. Dette medfører, at det er muligt at bestemme en unik løsning. Ulempen er, at den konceptuelle forståelse af stoftransport i kalk ikke er korrekt, hvilket medfører, at modelfejlen er større for metode 1 og 2 end for metode 3. Hver metode til at modellere forsøget har herved en total fejl for modellens brug til at forudsige stoftransporten. Dette er illustreret på figur 4.22.



Figur 4.22: Størrelsesorden af hhv. parameter og model fejl samt fejl for forudsigelsen. (Jensen, 2003, Redigeret)

Grundet, at diffusionsprocessen ikke beskrives fuldt dynamisk kan følgende spørgsmål stilles:

- Hvilken metode giver den mindste fejl for forudsigelsen af stoftransporten?
- Er de simple modellers konceptuelle beskrivelse tilstrækkelige til at beskrive processerne i kalk?
- Er det muligt at kalibrere parametrene tilstrækkeligt ved metode 3?

4.5.1 Analytisk advektion-sorption-dispersions model

Beregninger tilknyttet den analytiske advektion-sorption-dispersions model findes i bilag E.4.5.

Metode

En analytisk løsning til advektion-dispersions ligningen er ligning (4.9) præsenteret af Nielsen og Biggar i 1962. (Loll og Møldrup, 2000)

$$\frac{C_L(L,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L - u_{eff}t}{\sqrt{4D_R t}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{u_{eff}L}{D_R}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{L + u_{eff}t}{\sqrt{4D_R t}}\right)$$
(4.9)

Længden, *L*, er lig længden af kalkblokken på 61 cm. Den effektive porevandshastighed er hastigheden hvormed 50% af stoffet er gennembrudt, se tabel 4.3. Den eneste ukendte i formlen er dermed den effektive diffusions-dispersionskoefficient, som er diffusions-dispersionskoefficienten divideret med retentionsfaktoren. Ved at skrue på D_R kan ligning (4.9) fittes til forsøgenes gennembrudskurver, og D_R kan hermed bestemmes.

Forudsætninger

Denne metode kan anvendes under forudsætningerne:

- Stationært flow
- Da trykgradienten har været konstant under hvert forsøg er denne forudsætning opretholdt.
- Jorden er homogen

Denne forudsætning overholdes højtsandsynligt ikke, da kalk indeholder sprækker af forskellige størrelse og retning. Da det dog forekommer, at sprækkerne er jævnt fordelt, fungerer kalken som et ensartet materiale.

- Begyndelses- og randbetingelser
- $C_L = 0 \text{ for } t < 0 \text{ og } x \ge 0$

$$C_L = C_0 \text{ for } t \ge 0 \text{ og } x = 0$$

$$C_L = 0$$
 for $t \ge 0$ og $x \to \infty$

For forsøg 1 er disse begyndelses- og randbetingelser overholdt. For forsøg 2 vil startkoncentrationen i blokken være lig slutkoncentrationen fra forsøg 1, hvorved denne koncentration bliver forsøgets nulpunkt. Begyndelses- og randbetingelser er herved overholdt for forsøg 2. Ved forsøg 3 vil der sidde en restkoncentration af salt i matricen fra forsøg 1, denne rest vil påvirke gennembrudstidspunktet, således det vil ske tidligere. Forskellen mellem gennembrudskurven for forsøg 1 og 3, vil derfor være et udtryk for koncentrationen i matricens indflydelse. Herved vil det, at koncentrationen er større end nul, derfor være uden betydning. Ved forsøg 4 er det samme gældende som ved forsøg 2.

Resultater

Ved brug af de beregnede effektive porevandshastigheder, se tabel 4.3, og en lav effektiv diffusionsdispersionskoefficient, kommer 50% gennembruddet til samme tid i modellen som ved forsøget, hvilket er illustreret på figur 4.23 og 4.24 (blå grafer). Når der efterfølgende skrues op for diffusionsdispersionskoefficienten er det fundet, at tiden for 50% gennembrud flyttes frem således, at 50% gennembruddet kommer før i modellen end ved forsøget. Dette skyldes, at koncentrationen bevæger sig bagud, hvilket ikke kan lade sig gøre. For at kompensere for denne modelfejl skrues retentionsfaktoren tilsvarende op. På figur 4.23 og 4.24 (grønne grafer) ses fittede analytiske løsninger til måledata.



Figur 4.23: TV: Den analytiske løsning fittet til tiden for 50% gennembrud og bedste fit til måledata for forsøg 1.

TH: Den analytiske løsning fittet til tiden for 50% gennembrud og bedste fit til måledata for forsøg 2.



Figur 4.24: TV: Den analytiske løsning fittet til tiden for 50% gennembrud og bedste fit til måledata for forsøg 3.

TH: Den analytiske løsning fittet til tiden for 50% gennembrud og bedste fit til måledata for forsøg 4.

I tabel 4.6 er de fittede diffusions-dispersionskoefficienter omregnet til en dispersivitet. Det ses, at der er fundet en dispersivitet i intervallet fra 60 til 600 cm.

Forsøg	θ_{eff}	v	D	τ_D	R
-	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{cm^2}{t}\right]$	[cm]	[-]
1	0,03	0,20	400	60	18
2	0,03	0,24	700	88	13
3	0,03	0,25	5000	600	15
4	0,03	0,23	700	91	20

 Tabel 4.6: Benyttede parameter til at fitte de analytiske løsninger (bedste fit) til de målte gennembrudskurver.

Ud fra de fittede analytiske løsninger til måledataene kan de konkluderes, at en simpel analytisk løsning kan beskrive stoftransporten i kalk under forudsætning af stationær strømning. Det er således ikke muligt med denne metode at undersøge den dynamiske respons i kalken.

4.5.2 Numerisk advektion-sorption-dispersions model opstillet i GMS

Beregninger tilknyttet den numeriske advektion-sorption-dispersions model findes i bilag E.4.6.

Metode

I GMS opbygges en simpel endimensional model af en enkelt række af 1000 celler. I dette tilfælde er det valgt en cellestørrelse på 1 x 1 x 1 cm. Modellen er således 10 m lang. Årsagen til, at modellen er gjort så meget længere end kalkblokkens 0,61 m er, at randen har betydning, når den styrende proces ved fitningen er dispersion, da der ikke kan forekommer dispersion over randen. Det er derfor nødvendigt at forlænge modellen. Opbygningen af model kan ses på figur 4.25.



Figur 4.25: Skitse af den opbyggede endimensionale model i GMS.

Et konstant trykniveau er indsat i celle 1 og celle 1000, svarende til hver enkelt forsøgsgradient. Der anvendes en middelværdi for den mættede hydrauliske ledningsevne på $9.3 \frac{\text{cm}}{\text{t}}$, som er bestemt ved forsøget. Den effektive porøsitet er sat til $0.03 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Med dette udgangspunkt beregnes flowet vha. MODFLOW-modulet. Det findes, at flowet i modellen stemmer overens med målte flow ved forsøg.

For at beregne kloridtransporten sættes en konstant koncentration i celle 1 til koncentrationen målt i kar 1 ved hvert forsøg. Som udgangspunkt sættes den longitudinale dispersivitet til 1 cm. Retentionsfaktoren beregnes i GMS ud fra ligning (4.10). Det er i denne forbindelse antaget en lineær sorptionsisoterm, da det forventes, at transporten af klorid ind og ud af matricen forekommer ens.

$$R = 1 + \frac{\rho_b \, K_d}{\theta_{eff}} \tag{4.10}$$

 $\text{Hvor } \rho_{\textit{b}} \text{ er bestemt til } \left(0.56 \, \frac{\text{m}^{3} \text{tør kalk}}{\text{m}^{3} \text{kalk}} \cdot 2710 \, \frac{\text{kg tør kalk}}{\text{m}^{3} \text{tør kalk}} + 0.44 \, \frac{\text{m}^{3} \text{porer}}{\text{m}^{3} \text{jord}} \cdot 1000 \, \frac{\text{kg vand}}{\text{m}^{3} \text{vand}} = 1958 \, \frac{\text{kg tør kalk}}{\text{m}^{3} \text{kalk}} \right)$

på baggrund af, at totalporøsiteten i kapitel 3 blev bestemt til 0,44 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Med udgangspunkt i retentionsfaktorene fra tabel 4.4 og $\theta_{eff} = 0.03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ kan en K_d -værdi bestemmes, som noteret i tabel 4.7.

Forsøg	R	K _d
	[-]	$\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}\right]$
1	11	$1,53 \cdot 10^{-4}$
2	6	$0,77\cdot 10^{-4}$
3	1	0
4	9	$1,\!23\cdot10^{-4}$

Tabel 4.7: Beregnede K_d ud fra bestemte R i tabel 4.4.

Med udgangspunkt i disse data, verificeres det, om modellens tid for 50% gennembrud passer til forsøgenes. Efterfølgende fittes modellen til forsøgenes gennembrudskurver ved at justere på K_d og τ_D .

Denne procedure anvendes til at fitte modellen til hvert enkelt af de fire forsøg. Efterfølgende fittes modellen til alle fire forsøg ved at lave modellen transient.

På grund af, at det er nødvendig at lave modellen længere end kalkblokkens egentlig længde, er det ikke muligt at lave massebalance for modellen og verificere, om massen af klorid i modellen stemmer overens med, hvad der er fundet ved forsøgene. Dette skyldes, at GMS gemmer massen i sorptionsfasen for hver celle i en binær fil, og det ikke er lykkedes at læse denne fil. Det er dog muligt at finde den totale masse i den mobile fase og sorptionsfasen. Disse data giver dog ingen mening, da der kun ønskes masser for de første 61 celler.

Resultater

På figur 4.26 og 4.27 ses de fittede kurver med modellen til måledata for forsøg 1 til 4. Det ses, at modellen passer til forsøgenes 50% gennembrudstider med de anvendte værdier bestemt ud fra måledata. Det er dog bemærket, at jo større retentionsfaktor desto større numerisk dispersion forekommer der i modellen. Ved fitning af modellen til måledata (Model bedste fit) findes det muligt at fitte modellen til alle fire forsøg. De benyttede parametre kan findes i tabel 4.8.



Figur 4.26: Fittede modelkurver til måledata for forsøg 1 (tv) og 2 (th).



Figur 4.27: Fittede modelkurver til måledata for forsøg 3 (tv) og 4 (th).

Forsøg	K_s	θ_{eff}	τ_D	K _d	R
	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$	[cm]	$\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}\right]$	[-]
1	9,3	0,03	75	$2,5 \cdot 10^{-4}$	18
2	9,3	0,03	100	$1,8 \cdot 10^{-4}$	13
3	9,3	0,03	300	$2,0\cdot 10^{-4}$	15
4	9,3	0,03	100	$2{,}5{\cdot}10^{-4}$	18

Det ses, at retentionen i tabel 4.8 er større end de beregnede værdier i tabel 4.7. Dette skyldes, at det er fundet nødvendigt at forøge retentionen, når modellen fittes til måledata med dispersionskoefficienten. Det skyldes en modelfejl, hvor tiden for 50% gennembruddet fremskydes ved forøgelse af dispersionskoefficienten. Forøgelsen af retentionsfaktoren er således en kompensation for modellens fejl.

Sammenlignes de fittede longitudinale dispersiviteter ses det, at værdierne for forsøg 1, 2 og 4 er rimelig ens, hvorimod den longitudinale dispersivitet for forsøg 3 er ca. tre gange så stor.

De longitudinale dispersiviteter bestemt for metode 1 og metode 2 er listet i tabel 4.9. Det ses, den longitudinale dispersivitet for metode 2 er højere end for metode 1 ved forsøg 1, 2 og 4, hvorimod det modsatte er gældende ved forsøg 3. Dette var ikke forventet, da der udover mekanisk dispersion i den numerisk model findes numerisk dispersion. Det var således forventet, at den longitudinale dispersivitet ved metode 2 ville have været mindre end ved metode 1 ved alle forsøgene. Årsagen til, at dette ikke er tilfældet, kan skyldes, at cellestørrelsen ved den numeriske model er lille, hvorved den numeriske dispersion er lille.

 Tabel 4.9: Dispersiviteter fundet ved metode 1 (Analytisk advektion-sorption-dispersions model) og metode 2 (Numerisk advektion-sorption-dispersions model), se hhv. tabel 4.6 og tabel 4.8.

Forsøg	Metode 1	Metode 2	
	$ au_D$	$ au_D$	
	[cm]	[cm]	
1	60	75	
2	88	100	
3	600	300	
4	91	100	

Med udgangspunkt i værdierne fundet ved forsøg 1, 2 og 4 kan alle forsøgenes gennembrudskurver modelleres med den transiente model som illustreret på figur 4.28. Det bedste fit er fundet med en effektiv porøsitet på $0,03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, longitudinal dispersivitet på 100 cm og en distributionskoefficient på $2,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$.



Figur 4.28: Fittet modelkurve til måledata for alle fire forsøg med den transiente model med udgangspunkt i de fittede værdier fundet ved fitting til forsøg 1, 2 og 4.

Det ses, at modellen ikke passer så godt til forsøg 1 og 3. Ved forsøg 1 rammer modellens tid for 50% gennembrud for tidligt og ved forsøg 3 for sent. Dette skyldes at modellen ikke beskriver stoftransporten i kalk korrekt, hvor klorid ophobes i kalkblokken efter forsøg 2.

4.5.3 Numerisk advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet opstillet i GMS

Beregninger tilknyttet den numeriske advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet findes i bilag E.4.7.

Denne model er en videreudvikling af den forrige GMS model. Her beskrives tilbageholdelsen af klorid ikke via sorption, men ved at modellen har to porøsiteter. Heraf udgør den ene porøsitet en mobil fase (sprækker) og den anden en immobil fase (matrice). Mellem de to faser sker en udveksling af stof via diffusion. Grundet at den konceptuelle forståelse af, hvorledes stoftransporten foregår i kalken, beskrives gennembrudskurverne ikke ved dispersion. Det er således muligt at sætte modellens længde lig kalkblokkens længde. Denne model er således kun 63 celler lang.

Som tidligere omtalt afhænger udvekslingen mellem sprækker og matrice blandt andet af mass transfer koefficienten. Hvis det antages, at afstanden mellem sprækkerne gennemsnitlig er 5 cm, og at matricens porøsitet er $0.38 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$, kan mass transfer koefficient bestemmes til:

$$\zeta = \frac{D_{0,l} \cdot \theta_{im}}{dx^2}$$

= $\frac{2,03 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 0,38 \frac{\text{cm}^3 \text{poren}}{\text{cm}^3 \text{jord}}}{\left(\frac{5 \text{cm}}{2}\right)^2}$
= $1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} = 4,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{t}}$

Denne værdi benyttes som udgangspunkt ved fitning af modellen til forsøgsdata.

En ulempe ved denne model er, at diffusionsprofilet ind i matricen ikke bliver korrekt beskrevet, da modellen bestemmer koncentrationsforskellen mellem den mobil og immobile fase som gennemsnitskoncentrationer i volumenet. Derfor vil diffusionen ind i matricen være større i modellen end i virkeligheden, når matricen har opbygget klorid i randen mellem sprækker og matrice, hvilket er illustreret på figur 4.29.



Figur 4.29: Skitse af forskellen mellem den virkelige diffusionsproces (tv.) og modellerede diffusionsproces i GMS (th.).

Denne fejl i modellen kan kompenseres for ved at reducere den immobile porøsitet. Herved bygges koncentrationen i matricen hurtigere op og dermed reduceres diffusionen ind i matricen. Ved hjælp af BEST (Buckingham-Einstein-Smoluchowski-Travel) ligningen findes det, at den immobile porøsitet skal reduceres til 0,27 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvis det antages, at den del af porøsiteten som deltager til tilbageholdelsen af stof udgøres af den andel som indeholder mere end 75% af startkoncentrationen ved tre ugers transport. Ved $\frac{C}{C_0} = 75\%$ er *ES* lig 0,203. Transportafstanden kan således beregnes til:

$$dx = \sqrt{ES D_{eff} t}$$

= $\sqrt{ES D_{0,l} \theta_{im} t}$
= $\sqrt{0,203 \cdot 2,03 \frac{m^2}{s} \cdot 0,4 \frac{cm^3 porer}{cm^3 jord} \cdot 3 uger}$
= 0,017 m

Antages en afstand mellem sprækkerne på ca. 5 cm kan den aktive del af den immobile porøsitet bestemmes til ca. 70%. Denne bestemmes ud fra, at $\frac{1.7 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \approx 70\%$. Ydermere kan mass transfer koefficienten reduceres, hvorved der skal opnås højere koncentrationer før der sker en tilbageholdelse. Proceduren ved anvendelse af denne model er først at fitte modellen til hvert forsøg og i denne forbindelse undersøge, hvorledes modellen bygger masse op i matricen. Efterfølgende modelleres alle forsøgene, og herved undersøges dynamikken i modellen.

Resultater

På figur 4.30 til 4.33 ses modellerede og målte gennembrudskurver for forsøg 1 til 4 (figurer til venstre) og hvorledes modellen bygger masse op i hhv. den mobile og immobile fase samt den totale masse (figurer til højre). I tabel 4.10 findes de anvendte parametre til at fitte modellen til måledata.



Figur 4.30: Til venstre ses modellerede og målte gennembrudskurver og til højre ses, hvorledes kloridmassen bygges op i den mobile og immobile fase samt den totale masse i modellen ved forsøg 1.



Figur 4.31: Til venstre ses modellerede og målte gennembrudskurver og til højre ses, hvorledes kloridmassen bygges op i den mobile og immobile fase samt den totale masse i modellen ved forsøg 2.



Figur 4.32: Til venstre ses modellerede og målte gennembrudskurver og til højre ses, hvorledes kloridmassen bygges op i den mobile og immobile fase samt den totale masse i modellen ved forsøg 3.



Figur 4.33: Til venstre ses modellerede og målte gennembrudskurver og til højre ses, hvorledes kloridmassen bygges op i den mobile og immobile fase samt den totale masse i modellen ved forsøg 4.

Tabel 4.10: Anvendte parametre benyttet til at fitte modellen til måledata. L_{sprækker} er sprækkeafstanden beregnet ud fra fittede θ_{im} , ζ og $D_{0,l}$ for klorid i vand på 2,03 · 10⁻⁹ $\frac{m^2}{s}$.

Forsøg	Ks	θ_{eff}	θ_{im}	τ_D	ζ	Lsprækker
	$\left[\frac{cm}{t}\right]$	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$	[cm]	$\left[\frac{1}{t}\right]$	[cm]
1	9,3	0,03	0,42	1	0,0040	5,5
2	9,3	0,03	0,33	1	0,0038	5,0
3	9,3	0,03	0,30	1	0,0020	6,6
4	9,3	0,03	0,47	1	0,0042	5,7

Det ses generelt, at modellen fitter bedre til måledata end de tidligere anvendte metoder.

Ved sammenligning af parameterværdier anvendt ved forsøg 1 og 3 ses det, at den immobile porøsitet går fra $0.42 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ved forsøg 1 til $0.30 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ved forsøg 3, samt at mass transfer koefficient går fra 0.0040 til $0.0020 \frac{1}{\text{s}}$ fra forsøg 1 til 3. Dette stemmer overens med det forventede, at når matricen ikke er modtagelig overfor klorid, grundet den i forvejen indeholde klorid ved forsøg 3, er det nødvendigt at reducere den immobile porøsitet og mass transfer koefficient for at fitte modellen til målte gennembrudskurver.

Ved sammenligning af parameterværdier ved forsøg 2 og 4 ses det, at den immobile porøsitet går fra $0,33 \text{ til } 0,47 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ fra forsøg 2 til 4. Dette hænger sammen med, at kloriden har haft længere tid til at diffundere ind i matricen. Ydermere ses det, at mass transfer koefficienten ved forsøg 2 og 4 er i samme størrelsesorden.

Ved omregning af de fittede mass transfer koefficienter, immobile porøsiteter og diffusionskoefficienten for klorid i vand til en sprækkeafstand findes et interval på 5,0 - 6,6 cm. Dette interval stemmer godt overens med de målte sprækkeafstande ved forsøget med brilliant blå.

I tabel 4.11 ses en sammenligning af beregnede masser, som findes i kalkblokken ved forsøgenes afslutning, med hvilke kloridmasser som findes i modellen. Det skal bemærkes, at da forsøg 2 og 4 er modelleret som gennembrudskurver og ikke nedbrydningskurver, sammenlignes de modellerede masser med de beregnede udvaskede mængder. Det ses herudfra, at der findes en acceptabel overensstemmelse mellem beregnede og modellerede masser. Årsagen til afvigelserne kan skyldes usikkerhed i de beregnede masser ved forsøget samt fejl i modellens konceptuelle beskrivelse af diffusionen ind i matricen.

Tabel 4.11: Sammenligning af beregnede kloridmasser tilbageholdt ved forsøg med modellerede masser. Forsøg 2 og 4 er modelleret som gennembrudskurver og ikke nedbrydningskurver, hvorved deres masser sammenlignes med de modellerede masser for de beregnede udvaskede mængder. Forsøg 3's masse sammenlignes med differencen mellem rest massen ved forsøg 3 og rest massen ved forsøg 2, se tabel 4.5.

	Beregnet	Model	Afvigelse
	[mg]	[mg]	[%]
Forsøg 1	214	250	16,8
Forsøg 2	143	185	29,4
Forsøg 3	149	190	27,5
Forsøg 4	207	300	44,9

Ud fra denne undersøgelse skal der anvendes forskellige parametersæt for at modellere hvert enkelt af forsøgenes gennembrudskurver. Dette skyldes dog, at hvert forsøg har forskellige begyndelsesbetingelser. Ved at lave modellen transient får hvert forsøg korrekte begyndelsesbetingelser forudsat, at modellen beskriver stoftransport tilstrækkelig korrekt. For at få en fornemmelse af, hvilken indflydelse den immobile porøsitet og mass transfer koefficient har i forhold til den transiente model, køres den transiente model med en immobil porøsitet på hhv. 0,15, 0,35 og 0,45 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. For hver er disse porøsiteter køres modellen med en mass transfer koefficient på 0,0001 $\frac{1}{t}$, 0,001 $\frac{1}{t}$, 0,002 $\frac{1}{t}$ og 0,004 $\frac{1}{t}$. For hver er de kørte modeller sammenlignes modellerede og målte gennembrudskurver samt, hvorledes modellede masser af klorid opbygges og udvaskes i modellen med beregnede masser.

Immobil porøsitet på 0,15 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$

På figur 4.34 ses de modellerede gennembrudskurve med en immobil porøsitet på $0,15 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ med forskellige mass transfer koefficienter. Det ses, at uanset størrelsen af mass transfer koefficienten tilbageholdes der ikke tilstrækkeligt med masse ved forsøg 1 og 3, og ved forsøg 2 og 4 er der derfor ikke tilstrækkeligt med masse til at skylle ud. Dette verificerer de modellerede kurver for opbygning af massen ligeledes, se figur 4.35 og 4.36. Det ses, at den maksimale masse, som modellen kan tilbageholde ved forsøg 1 og 3 er ca. 100 mg, hvilket er for lidt i forhold til den beregnede tilbageholdte masse ved forsøg 1 og 3 på ca. 200 mg.



Figur 4.34: Modellerede gennembrudskurver ved en immobil porøsitet på 0,15 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.35: Den totale masse i modellen med en immobil porøsitet på 0,15 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.36: Masse i den immobile fase i modellen med en immobil porøsitet på 0,15 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.

Immobil porøsitet på 0,35 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$

På figur 4.37 ses modellerede gennembrudskurver med en immobil porøsitet på $0.35 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ med forskellige værdier for mass transfer koefficienten. Det ses, at ved mass transfer koefficienter på $0,0001 \text{ og } 0,001 \frac{1}{\text{t}}$ tilbageholdes der stadig ikke tilstrækkeligt med masse, men ved de lidt højere værdier, $0,002 \text{ og } 0,004 \frac{1}{\text{t}}$, passer nogle af de modellerede gennembrudskurver til de målte. Det ses, at den modellerede gennembrudskurve med en mass transfer koefficienten på $0,004 \frac{1}{\text{t}}$ passer nogenlunde til forsøg 1, 2 og 4, hvorimod den med en mass transfer koefficient på $0,002 \frac{1}{\text{t}}$ passer bedst til forsøg 3.

Ses der på, hvorledes massen opbygges for disse modellerede gennembrudskurver på figur 4.38 og 4.39, ses det, at for de modellerede gennembrudskurver med en mass transfer koefficient på 0,002 og 0,004 $\frac{1}{t}$, hvor gennembrudskurverne passer nogenlunde til målte, passer de tilbageholdt masser i modellen rimeligt til de beregnede masser.



Figur 4.37: Modellerede gennembrudskurver ved en immobil porøsitet på 0,35 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.38: Den totale masse i modellen med en immobil porøsitet på 0,35 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.39: Masse i den immobile fase i modellen med en immobil porøsitet på 0,35 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.

Immobil porøsitet på 0,45 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$

På figur 4.40 ses modellerede gennembrudskurver ved en immobil porøsitet på $0.45 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ved forskellige mass transfer koefficienter. Ved sammenligning med de modellerede gennembrudskurver ved en immobil porøsitet på $0.35 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ses det, at kurvernes maksimale koncentration er sænket yderligere, hvilket hænger sammen med at en større masse tilbageholdes i matricen, se figur 4.41 og 4.42.



Figur 4.40: Modellerede gennembrudskurver ved en immobil porøsitet på 0,45 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.41: Den totale masse i modellen med en immobil porøsitet på 0,45 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.



Figur 4.42: Masse i den immobile fase i modellen med en immobil porøsitet på 0,45 $\frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ ved forskellige mass transfer koefficienter.
På baggrund af denne analyse kan det konkluderes, at den immobile porøsitet har størst betydning for størrelsen af massen, som tilbageholdes i matricen, og at mass transfer koefficienten har betydning for, hvor hurtigt transporten sker fra sprækker ind i matricen og modsat. Ydermere er det fundet at modellen ikke beskriver stoftransporten i kalk tilstrækkeligt til at fitte alle gennembrudskurverne. Enten fitter modellen godt til forsøg 1, 2 og 4 eller forsøg 3. For at finde en bedre model som fitter bedre til måledata er det valgt at lave en GLUE analyse, denne analyse er beskrevet i det efterfølgende afsnit.

4.6 Usikkerhed ved parameterbestemmelse ved numerisk model med dobbelt porøsitet

GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) metodologien forkaster ideen om, at der findes én optimal løsning, da det ofte er umuligt at beskrive det virkelige system fuldstændigt. Alle modeller har fejl, hvorfor flere modeller og forskellige parametersæt kan give lige gode løsninger. (Beven, 2009) På denne baggrund er det fundet relevant at afprøve metoden på den transiente advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet, da det er fundet gennem den tidligere fitningsproces, at det er muligt, at der findes flere parametersæt, som giver gode fit til måledata. Beregninger samt databehandling findes i bilag E.4.8.

GLUE metoden anvendes som beskrevet nedenfor og illustreret på figur 4.43:

- 1. Der genereres tilfældige parametersæt ud fra opstillede fordelingsfunktioner for den hydrauliske ledningsevne, den effektive og immobile porøsitet samt mass transfer koefficienten.
- 2. Modellen køres for hvert parametersæt.
- 3. Efterfølgende evalueres resultatet fra modellen ved at sammenligne model og måledata for gennembrudskurverne. Hvis resultatet fitter godt til observationer accepteres parametersættet og tildeles en sandsynlighed efter, hvor godt det fitter. Hvis resultatet ikke fitter til observationer forkastes løsningen.



Figur 4.43: Oversigt over GLUE metoden.

Udover de fire udvalgte parametre kunne den hydrauliske gradient også være udvalgt, men da både den hydrauliske ledningsevne og gradienten benyttes til at beregne flowet, er det valgt at betragte usikkerheden på flowet samlet i den hydrauliske ledningsevne.

Det er valgt at anvende metoden på forsøg 1 og 2, da det tidligere er fundet, at modellens konceptuelle beskrivelse af, hvorledes transporten forekommer i kalk ikke er tilstrækkelig korrekt til, at modellen er i stand til at beskrive transporten af klorid for alle forsøgene. Ud fra de kørte simuleringer er det muligt at præcisere intervallet for hver enkel parameter i forhold til, hvilke værdier som giver de bedste fit til observationer. Efterfølgende anvendes det parametersæt, som giver det bedste fit til forsøg 1 og 2, på alle forsøgene for at evaluere, hvor godt denne model fitter til alle forsøgene.

4.6.1 Histogrammer for udvalgte parametre

I dette afsnit beskrives hvilke fordelinger der er benyttet til den tilfældige udvælgelse af parametersæt. Der genereres i alt 30000 parametersæt.

For hver af de udvalgte parametre laves en fordelingsfunktion, hvor 30000 tilfældige parametre genereres og sammensættes som parametersæt. Nedenfor beskrives, hvorledes fordelingsfunktioner er opstillet, og sandsynligheden for generering af en given parameterværdi illustreres via et histogram.

Fordelingsfunktionen for den hydraulisk ledningsevne laves som en jævn fordeling i intervallet 1 - $25 \frac{\text{cm}}{\text{t}}$, denne kan ses illustreret som histogram på figur 4.44. Intervallet er valgt på baggrund af den fundne usikkerhed ved bestemmelsen af den hydrauliske ledningsevne se afsnit 4.4, hvor spændet blev fundet til 5 - $22 \frac{\text{cm}}{\text{t}}$.



Figur 4.44: Histogram for den hydrauliske ledningsevne.

Fordelingsfunktionen for den effektive porøsitet laves som en jævn fordeling i intervallet 0,015 - $0,06 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ og kan ligeledes ses illustreret som histogram se figur 4.45.



Figur 4.45: Histogram for den effektive porøsitet.



Fordelingsfunktionen for den immobile porøsitet laves som en jævn fordeling i intervallet 0,2 - $0.5 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ og ses illustreret på figur 4.46.

Figur 4.46: Histogram for den immobile porøsitet.

Den totale porøsitet kommer herved til at ligge i intervallet fra 0,215 til 0,56 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$

Fordelingen som benyttes til at generere tilfældige værdier for mass transfer koefficienten er en lognormal fordeling med en middelværdi på $0.05 \frac{1}{t}$ og en varians på 10. De genererede værdier ses illustreret via et histogram på figur 4.47. Som det ses på figuren er intervallet meget bredt, da der haves begrænset information om mass transfer koefficienten. Dog er det valgt at have største sandsynlighed for en værdi i intervallet $10^{-4} - 10^{-2} \frac{1}{t}$, da dette interval er fundet mest sandsynligt ved fitningsprocessen.



Figur 4.47: Histogram for mass transfer koefficienten.

4.6.2 Evaluering af resultat fra model

Frasorteringskriterier

Evaluering af resultatet fra modellen foregår ved at sammenligne modellerede og målte gennembrudskurverne for klorid. Det er valgt at lave to forskellige frasorteringskriterier med hver deres tildeling af sandsynlighed.

Metode 1

Den første metode for frasortering har tre betingelser, som skal være overholdt for at en potentiel løsning bliver accepteret. Disse er:

$$\begin{aligned} R^2 &\geq 0.95\\ |C_{obs}(t_i) - C_{model}(t_i)| &\leq 1.5 \, \frac{\text{mg}}{\text{L}}\\ \sum_{i=1}^n |C_{obs}(t_i) - C_{model}(t_i)| &\leq 25 \, \frac{\text{mg}}{\text{L}} \end{aligned}$$

Det første kriterium kræver, at der er korrelation mellem målt og modelleret gennembrudskurver. Det andet kriterium kræver, at differencen mellem observerede og modellerede punkter for koncentrationen af klorid ikke er større end $\pm 1.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Det tredje og sidste krav er at summen af alle afvigelser fra observationsdata højest må være $25 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Da der i alt er 47 målepunkter giver dette en gennemsnitlig afvigelse på $0.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ pr. modelleret punkt.

Metode 2

Den anden metode for frasortering har to betingelser, som skal overholdes for, at en løsning bliver accepteret. Disse er:

$$R^2 \ge 0.95$$

$$C_{obs}(t_i) - C_{model}(t_i) | \le 1.3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Det første krav er ligeledes, at der skal være korrelation mellem modellerede og observerede data. Det andet krav er, at hvert modelleret punkt maksimalt må afvige fra måledata med $\pm 1.3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$.

Denne sidste metode sætter derfor strengere krav for hvert målepunkt, hvorimod den første metode sætte et hårdere krav til løsningen totalt set.

Tildeling af sandsynlighed for accepterede løsninger

Til hver af de to frasorteringsmetoder er der lavet en metode til at bedømme, hvor godt den enkelte løsning fitter til observationspunkter.

Metode 1

Til det første frasorteringskrav er bedømmelsesmetoden lavet som bælter fra observationspunktet, se figur 4.48. Hvis et modelleret punkt afviger med højst $0.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ tildeles dette modellerede punkt sandsynligheden 1, afviger det modellerede punkt med mere end 0.25 og højst 0.5 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ tildeles dette modellerede punkt sandsynligheden 0.75 osv.



Figur 4.48: Tildeling af sandsynlighed ved metode 1.

Efter tildelingen af sandsynlighed for hvert modelleret punkt, beregnes en total sandsynlighed for

et givent parametersæt som løsning ud fra ligning (4.11). Herved rangeret hver af de accepterede løsninger i intervallet fra nul til en.

$$L_{total} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_i}} \tag{4.11}$$

Der er i alt 47 målte koncentrationer med elektroden, hvorfor n = 47.

Metode 2

For det andet frasorteringskrav er bedømmelsen lavet som en normalfordeling med en middelværdi på observationsværdien og en varians på 0,2, denne metode ses illustreret på figur 4.49. Metoden ligner meget metode 1 dog falder sandsynligheden hurtigere med afvigelsen end ved metode 1.



Figur 4.49: Tildeling af sandsynlighed ved metode 2.

På lignende vis beregnes en total sandsynlighed for et givent parametersæt som løsning via ligning (4.12). Herved opnås ligeledes, at løsningerne rangeres i intervallet fra nul til en.

$$L_{total} = \frac{n \cdot \frac{1}{L(middelværdi)}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_i}}$$
(4.12)

4.6.3 Resultater for GLUE analysen

Af de 30000 simuleringer er 353 simuleringer blevet godkendt af metode 1, og 50 simuleringer er blevet godkendt af metode 2, hvor af 12 simuleringer er godkendt af begge metoder. Der er således 12 af 30000 simuleringer, hvor afvigelsen mellem modellerede og observerede punkter er højst 1,3 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$, og summen af afvigelser højst er 25 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$.

På figur 4.50 til 4.53 ses plots af sandsynligheden ved de to metoder for frasortering og bedømmelse af løsninger for hhv. den hydrauliske ledningsevne, den effektive og immobile porøsitet samt mass transfer koefficienten.

På figur 4.50 ses det, at for den hydrauliske ledningsevne ligger de accepterede løsninger i intervallet 4 - 16 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$ ud af input intervallet på 1 - 25 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$. Metode 1 har en tendens til at have de bedste løsninger i intervallet 5 - 12 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$, og metode 2 i intervallet 5 - 9 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$. Dette tyder på at der ikke findes en entydig løsning til, hvad den hydrauliske ledningsevne skal være for at give det bedste fit af model til forsøget.



Figur 4.50: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for den hydrauliske ledningsevne.

På figur 4.51 ses det, at de accepterede løsninger for den effektive porøsitet ligger i hele input intervallet på $0,015 - 0,06 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$, hvoraf parametrene blev genereret. Der er således ikke nogen tendens til, hvilken værdi for den effektive porøsitet, som giver det bedste fit.



Figur 4.51: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for den effektive porøsitet.

På figur 4.52 ses sandsynligheden for givne værdier for den immobile porøsitet. Det ses, at ligesom for den effektive porøsitet ligger de accepterede løsninger for begge metoder i hele input intervallet på $0,20 - 0,50 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvorved der heller ikke findes en tendens til en bestemt værdi for den immobile porøsitet, der giver det bedste fit.



Figur 4.52: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for den immobile porøsitet.

På figur 4.53 ses det, at de accepterede løsninger for mass transfer koefficienten ved begge metoder ligger i intervallet 0,001 til 0,01 $\frac{1}{t}$, hvor input intervallet spændte fra 10^{-7} - $10 \frac{1}{t}$. Der er således fundet et afgrænset område for, hvad mass transfer koefficienten skal være. Ydermere ses der en tendens til, at de bedste fit af modellen til måledata findes ved en mass transfer koefficienten i intervallet 0,0020 - 0,0035 $\frac{1}{t}$. Dette interval ligger lidt under de fittede mass transfer koefficienter for hvert enkelt forsøg, se tabel 4.10 på side 68.



Figur 4.53: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for mass transfer koefficienten.

En årsag til, at der ikke findes nogen tendens for, hvilke værdier som giver de bedste fit for den hydrauliske ledningsevne og effektive og immobile porøsitet, kan være, at de er korrelerede, hvorved forskellige parametersæt kan give det samme resultat.

Korrelation mellem parametre

Ved at plotte parametrene for de accepterede simuleringer mod hinanden, kan det findes, om der er tendens til korrelation mellem de plottede parametre se figur 4.54 til 4.59.

På figur 4.54 ses den hydrauliske ledningsevne plottet mod den effektive porøsitet. Det ses, at der forekommer en tendens til, at der ikke kan forekomme fitninger ved lave hydrauliske ledningsevner og høje effektive porøsiteter. Dette skyldes, at der ved denne sammensætning opnås en lav porevandshastighed. Derudover findes der ikke nogen tendens, hvorfor der ikke findes en entydig tendens til, hvad porevandshastigheden skal være for at modellen fitter til måledata. Dette kan skyldes, at andre parametre forsinker kloriden.



Figur 4.54: Korrelation med den hydrauliske ledningsevne og effektiv porøsitet.

På figur 4.55 ses det, at ved stigende hydraulisk ledningsevne stiger en immobile porøsitet ligeledes. Det skyldes, at når den hydrauliske ledningsevne stiger, forøges flowet og derved også porevandhastigheden, for at de modellerede punkter stadig fitter til observationer kræves der en større tilbageholdelse af stof, hvilket kan gøres ved at forøge den immobile porøsitet.



Figur 4.55: Den immobile porøsitet som funktion af den hydrauliske ledningsevne.

På figur 4.56 ses det ligeledes, at ved stigende hydraulisk ledningsevne har mass transfer koefficienten tendens til at stige. Dette skyldes, at ved en forøget hydraulisk ledningsevne kræves en større tilbageholdelse, hvilket kan opnås ved at forøge mass transfer koefficienten.



Figur 4.56: Mass transfer koefficienten som funktion af den hydrauliske ledningsevne.



På figur 4.57 ses det, at der ikke findes nogen tendens til korrelation mellem den effektive og immobile porøsitet.

Figur 4.57: Den immobile porøsitet som funktion af den effektive porøsitet.

På figur 4.58 ses det, at der ikke findes nogen tendens til korrelation mellem den effektive porøsitet og mass transfer koefficienten.



Figur 4.58: Mass transfer koefficienten som funktion af den effektive porøsitet.

På figur 4.59 ses det at jo større immobile porøsitet desto større mass transfer koefficient. Ved en øget immobil porøsitet er en øget mass transfer koefficient nødvendig for at skabe halerne for forsøg 1 og 2.



Figur 4.59: Mass transfer koefficienten som funktion af den immobile porøsitet.

Det findes således, at:

- Den hydrauliske ledningsevne har tendens til at være korreleret med både den immobile porøsitet og mass transfer koefficienten.
- Den effektive porøsitet ikke er korreleret med nogle af de andre parameter, hvilket kan skyldes, at den har mindre betydning i forhold til de andre parametre.
- Den immobile porøsitet har tendens til at være korreleret med både den hydrauliske ledningsevne og mass transfer koefficienten.

På baggrund af denne observation er det valgt at køre 30000 nye simuleringer, hvor den hydrauliske ledningsevne sættes lig en konstant, som i dette tilfælde er valgt til 7 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$. En hydraulisk ledningsevne på 7 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$ er valgt, da metode 2 kræver højere en immobile porøsitet end 0,5 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ved en hydraulisk ledningsevne på 9,3 $\frac{\text{cm}}{\text{t}}$ se figur 4.55. Herved forventes det, at kunne se en tendens for, hvilke værdier for den immobile porøsitet og mass transfer koefficienten, som giver det bedste fit af modellen til observationerne.

4.6.4 Simuleringer med konstant hydraulisk ledningsevne

Af 30 000 kørte simuleringer er 2858 simuleringer blevet godkendt af metode 1, og 609 simuleringer af metode 2, hvoraf 116 simuleringer er godkendt af begge metoder.

På figur 4.60 ses sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given effektiv porøsitet. Det ses, at metode 1 har tendens til at have bedste fit ved hhv. en effektiv porøsitet på 0,015 og $0.045 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvorimod metode 2 kun topper ved $0.045 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Årsagen til at metode 1 topper to steder kan skyldes, at denne metode godkender flere forskellige former for løsninger, da den ikke stiller så høje krav til afvigelsen mellem modellerede og målte værdier for hver enkelt måling.



Figur 4.60: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for den effektive porøsitet.

På figur 4.61 ses sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given immobile porøsitet. Det ses, at metoderne har hver deres toppunkt. Metode 1 finde løsningerne bedst ved en immobil porøsitet på $0.3 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, og metode 2 ved en immobil porøsitet på $0.36 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.



Figur 4.61: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for den immobile porøsitet.

På figur 4.62 ses sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given mass transfer koefficient. Det ses, at de to metoder finder de bedst fit ved næsten samme mass tranfer koefficient på ca. $0,003 \frac{1}{t}$.



Figur 4.62: Sandsynligheden for et godt fit til observationer ved en given værdi for mass transfer koefficient.

I tabel 4.12 ses de parametersæt, som giver det bedste fit af modellen til måledata for hver metode. Sandsynligheden præsenteres for den accepterede løsning, og såfremt denne simulering også er godkendt af modsatte metode noteres denne ligeledes. Det ses, at den bedste simulering ved metode 1 også godkendes ved metode 2, men at dette ikke er gældende omvendt.

	Metode 1	Metode 2
$K_s \left[\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{t}}\right]$	7	7
$\theta_{eff} \left[\frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}} \right]$	0,045	0,050
$\tau_D [cm]$	1	1
θ_{im} [-]	0,29	0,36
$\zeta \left[\frac{1}{t}\right]$	0,0029	0,0025
L _{sprækker} [cm]	5,4	6,5
$R^{2}[-]$	0,99	0,98
L ved metode 1 $[-]$	0,684	0,588
L ved metode $2[-]$	ej accepteret	0,243

Tabel 4.12: Parametersæt og tilhørende sandsynlighed for de to simuleringer som giver det bedste fit med hhv. metode 1 og 2. Det skal bemærkes, at L_{sprækker} er udregnet fra mass transfer koefficient, immobil porøsitet og diffusionskoefficienten for klorid i vand.

Ved sammenligning af de to parametersæt, som giver bedste fit, fundet ved metode 1 og 2, ses det, at den største forskel er at finde på den immobile porøsitet. Gennembrudskurver for parametersættene til alle forsøgene kan ses på figur 4.63.



Figur 4.63: Gennembrudskurver for måledata og bedste fit ved hhv. metode 1 og 2.

Det ses, at både metode 1 og 2 rammer nogenlunde tiderne for 50% gennembrud, på dette punkt er de to metoders bedste fit rimelig ens. Ingen af metoderne formår dog at fitte til alle forsøgene gennembrudskurver. Modellerne har heraf særligt svært ved at fit til gennembrudskurven for forsøg 3, hvor modellerne bøjer for tidligt af. Dette var som tidligere omtalt forventet, da metoden ikke beskriver stoftransportprocesserne tilstrækkeligt korrekt.

På figur 4.64 og 4.65 ses, hvorledes de to modeller bygger klorid op og vasker det ud igen. Det ses, at ingen af modellerne tilbageholder tilstrækkeligt med masse ved forsøg 2 og 4s afslutning i forhold til, hvad der er beregnet ud fra måledata.



Figur 4.64: Opbygning og udvaskning af kloridmasse for det bedste parametersæt ved metode 1.



Figur 4.65: Opbygning og udvaskning af kloridmasse for det bedste parametersæt ved metode 2.

Det kan således konkluderes, at denne metode, numerisk advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet i GMS, fitter bedre til alle forsøgenes tider for 50% gennembrud end metoden med numeriske advektion-sorption-dispersions model i GMS. Dog beskriver denne metode ikke transporten af klorid tilstrækkeligt korrekt til at kunne beskrive forsøgenes gennembrudskurver fuldstæn-digt.

Følgende spørgsmål blev ved modelleringens start opstillet og disse besvares nedenfor:

- Hvilken metode giver den mindste fejl for forudsigelsen af stoftransporten?

Ved opsættelse af de tre metoder findes det, at modellen med færrest fejl er dobbelt porøsitetsmodellen. Det er dog påkrævet, at kalibreringen er udført til fulde, da dobbelt porøsitetsmodellen har flere parametre, der skal kalibreres.

- Er de simple modellers konceptuelle beskrivelse tilstrækkelige til at beskrive processerne i kalk?

Det er fundet, at alle 3 metoder kan fittes til observationer, dog har de tre metoder hver sin anvendelighed.

Metode 1 (Analytisk advektion-sorption-dispersions model) har sin anvendelighed til at verificere de numeriske modeller samt til modellering af simple tilfælde. Den analytiske løsning tager som bekendt ikke højde for en variation i randbetingelserne, og kan derfor ikke benyttes i større områder som eksempelvis Drastrup, da der her sker en ændring i den tilførte nitratkoncentration grundet arealomlægningen.

Metode 2 (Numerisk advektion-sorption-dispersions model opstillet i GMS) er numerisk, og kan derfor tage højde for en variation i randbetingelserne. Da tilbageholdelsen af stof sker på baggrund af en retentionsfaktor tages der således ikke højde for, at ved en øget koncentration i sprækker vil der ske en øget tilbageholdelse i matricen forudsat, at koncentrationen i matricen er lav. Metode 2 har et mindre parametersæt end metode 3, hvilket medfører, at modellen er lettere at kalibrere.

Metode 3 (Numerisk advektion-diffusion-dispersions model med dobbelt porøsitet opstillet i GMS) er numerisk, og kan derfor ligeledes tage højde for en variation i randbetingelserne. Modellen har den mest korrekte procesmæssige beskrivelse, da der her tages højde for, at ved en øget koncentration i sprækkerne vil en større diffusion ske. Modellen tager dog ikke højde for, at diffusionsprocessen er afstandsafhængig, da matricen blot beskrives ved en celle pr. numerisk celle. Ydermere beskrives overførslen mellem matrice og sprækker ved en konstant mass transfer koefficient. Metode 3 er af de tre metoder mest kompliceret at kalibrere, da mængden af parametre øges, og det er fundet, at flere at parametrene er korrelerede.

- Er det muligt at kalibrere parametrene tilstrækkeligt ved metode 3?

Som beskrevet ovenfor er det muligt at kalibrere parametrene tilstrækkeligt ved metode 3. Ved udført GLUE analyse findes dog, at forskellige parametersæt kan give en acceptabel løsning.

4.7 Sammenfatning

Ud fra forsøget på en intakt kalkblok med en længde på 61 cm findes det muligt at beskrive strømninger og stoftransport. Det er fundet, at kalkblokken har en hydraulisk ledningsevne på $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, en effektive porøsitet på $0,03 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$ og at dispersionen igennem kalkblokken er lille.

Det konkluderes, at stoftransporten er stærkt styret af stofudvekslingen mellem sprækker og matrice, da udvekslingen medfører en tilbageholdelse af stof. Ved udførelsen af farvestofforsøget er det fundet, at kalkblokken indeholder to skalaer af sprækkesystemer. Et, hvor afstanden mellem sprækkerne er i intervallet 0,5 - 2 cm, og et, hvor afstanden mellem sprækkerne er 5 - 10 cm, som i dette tilfælde er det mellemste sprækkesystem. Det mellemste sprækkesystem fungerer som fordelingsnet til de små sprækker, som skaber en stor sprækkeoverflade, hvorved diffusion ind i matricen får afgørende betydning. Til at beskrive tilbageholdelsen af stof i matricen er tre modeller blevet opstillet. Det er fundet, at tilbageholdelsen af stof kan beskrives ved alle tre modeller. Ydermere er det fundet, at selv ved den mest detaljerede metode, numerisk model med dobbelt porøsitet, er modellens konceptuelle beskrivelse af det dynamiske system ikke tilstrækkelig til at kunne eftervise forsøgenes gennembrudskurver helt korrekt. På denne baggrund er det vurderet at en mere simpel metode, hvor udvekslingen af stof mellem sprækker og matrice sættes ækvivalent med en retentionsfaktor, er mere fordelagtig at benytte, da metoden er lettere at kalibrere end modellen med dobbelt porøsitet.

Ud fra modelleringen af strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala kan det således konkluderes, at det er essentielt at beskrive diffusionsprocessen mellem sprækker og matrice korrekt.

Strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala

Ved de hidtidige to forsøg, strømningsforsøg på lille skala og strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala, er hydrogeologiske og stoftransport parametre blevet bestemt via forsøg i laboratoriet. Da stoftransporten er af stor betydning for den fremtidige drikkevandskvalitet i Drastrup, udføres et strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala på lokaliteten. I dette tilfælde udføres et pushpull forsøg, som er en tracer test, hvor der anvendes én boring. Denne test giver således en bedre bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne og effektive porøsitet. Parametrene bestemmes ved at opstille en numerisk model som fittes til måledata. Grundet en kort tidshorisont for forsøget på under et døgn er det vurderet, at diffusionen mellem sprækker og matrice er uden betydning, hvorfor modellen opstilles som en enkelt porøsitetsmodel. Forsøget har således til formål at beskrive, hvorledes stof bliver transporteret i den horisontale retning over ca. 400 cm i Drastrup. Dette er illustreret på figur 5.1.



Figur 5.1: Formålet med at udføre dette strømnings- og stoftransportforsøg i felten er at blive i stand til at beskrive stoftransport over ca. 400 cm i Drastrup. C_0 er en introduceret startkoncentration, og C(t) er stoffets koncentration efter en drive-tid.

5.1 Forsøgets formål

Push-pull forsøget har til formål at bestemme de hydrogeologiske parametre, mættet hydraulisk ledningsevne og effektiv porøsitet. I modsætning til tidligere forsøg, som er udført i laboratoriet, udføres dette forsøg i felten og på større skala. Skalaen afhænger dog af drive-længden. Det vil sige, hvor langt traceren får lov af drive nedstrøms for boringen, beskrevet nedenfor. Parametrene, som bestemmes ved strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala, er listet i tabel 5.1

-	
Bestemte	Skala
parametre	Stor
Ks	x
$\frac{K_h}{K_{m}}$	-
θ_{total}	-
θ_{eff}	x
Θ_{im}	-
τ_D	(x)
ζ	-

Tabel 5.1: De ønskede bestemte parametre på stor skala. x er parametre som bestemmes, (x) er parametre som ikke bestemmes direkte, men der gives et estimat på baggrund af forsøget, og - er ikke bestemte parametre ved det pågældende forsøg.

For at give læseren den fulde forståelse af, hvad et push-pull forsøg er, gives en kort forklaring af, hvorledes forsøget udføres, hvilke data der indsamles, samt hvorledes disse analyseres.

I forbindelse med litteratursøgning gøres læseren opmærksom på, at push-pull forsøget går under flere terminologier, heriblandt: 'Push-pull', 'Push, drift, and pumpback' og 'Single well tracer test'.

Kort forklaring af push-pull forsøget

Simpelt forklaret er et push-pull forsøg et stoftransportforsøg, hvor der benyttes én boring både til at injicere og tilbagepumpe en tracer. Forsøget benyttes til at bestemme den mættede hydrauliske ledningsevne og effektive porøsitet.

En simpel gennemgang af et push-pull forsøg forløber som beskrevet nedenfor og illustreret på figur 5.2:

- 1. Saltvand (en tracer) hældes i boringen. Der benyttes klorid, da dette er et ikke-reaktivt stof.
- 2. Rent vand (en chaser) hældes i boringen for at skubbe traceren væk fra boringen.
- 3. Traceren får lov til at drive med strømmen ved den naturlige gradient.
- 4. Efter traceren opstrøms har passeret dataloggeren placeret i boringen, startes pumperne i moniteringsboringen for at vende gradienten og traceren pumpes tilbage.
- 5. Ved analyse af data samt fitning af en numerisk grundvandsmodel til observeret data bestemmes de hydrogeologiske parametre.



Figur 5.2: Princip for stoftransporten ved et push-pull forsøg.

Ved konstant logning af koncentration samt tryk i boringen kan gennembrudskurven samt ændringen i tryk grundet injicering af tracer i boringen optegnes.

Forventet data

På figur 5.3 ses et forventet koncentrationsforløb fra dataloggeren i boringen. Koncentrationsforløbet er fra et push-pull forsøg udført af Claes (2011), som ligeledes har udført forsøget på kalk.



Figur 5.3: Forventet koncentrationsforløb. (Claes, 2011, Redigeret)

Ud fra gennembrudskurven er det muligt at bestemme den effektive porøsitet, se ligning (5.1). Denne bestemmes på baggrund af den tid, det tager centeret af kloridfanen at blive transporteret tilbage til boringen og den anvendte pumperate. Ligning (5.1) er en modificeret ligning af Claes (2011), originalt fra Leap og Kaplan (1998) sammensat med Darcys ligning i. Antagelserne tilknyttet ligningen er præsenteret i Claes (2011).

$$\theta_{eff} = \frac{\pi b K_s^2 d^2 \left(\frac{dh}{dl}\right)^2}{Qt}$$
(5.1)

Tiden, t, er tiden, det tager at pumpe halvdelen af massen tilbage. I boringen logges udover kloridkoncentrationen ligeledes trykket. Den hydrauliske ledningsevne bestemmes på baggrund af ændringen i trykhøjden grundet den introducerede tracer og chaser. Ved den 3D numeriske grundvandsmodellering kontrolleres løbende, at trykændringen stemmer overens med observerede trykændring. Modellen benyttes endvidere til at verificere de resterende bestemte parametre.

5.2 Forsøgets lokalitet

Forsøget udføres ved Drastrup kildeplads 1 på moniteringsboringerne 34. 2289 og 34. 2290. Boringernes placering fremgår af figur 5.4. Borejournaler for de to boringer findes i appendiks B. Moniteringsboringerne er valgt på baggrund af fire kriterier:

- 1. Boringerne benyttes løbende til monitering og har derfor fastmonterede pumper. De fastmonterede pumper har en ydelse på ca. $2 \frac{m^3}{t}$.
- 2. Størrelsen på filteret er Ø125, hvilket giver mulighed for at både pumpe samt en datalogger (Aqua TROLL 200) kan være i boringen.
- 3. Boringerne er filtersat i et kalkakvifer.
- 4. Der forekommer ingen lagdeling nær boringerne, se appendiks G.

Ved denne forsøgsudførelse er en indvindings- og udledningstilladelse nødvendig, hvilket er søgt ved Aalborg Forsyning, Vand A/S og Aalborg Kommune. Indvindingstilladelsen er vedlagt som bilag E.5.1 og udledningstilladelsen som bilag E.5.2.



Figur 5.4: Udvalgte monteringsboringers placering til push-pull forsøget samt hhv. vandværk og Drastrup kildeplads 1 og 2. (Aalborg Universitet, 2004)

5.3 Forsøgets udførelse

Før forsøget kan igangsættes er det nødvendigt at beregne et estimat på, hvor langt traceren kan drive, således pumpen stadig kan indfange traceren. For at estimere dette opstilles en simpel grundvandsmodel. Herefter kan forsøget udføres og måledata kan behandles. Fremgangsmåden for forsøget er illustreret på figur 5.5.



Figur 5.5: Princip til udførelsen af push-pull forsøget.

5.3.1 Simpel grundvandsmodel

En opstillet grundvandsmodel i GMS benyttes til at bestemme indvindingszonen for de fastmonterede pumper, og herved haves et bud på, hvor lang tid traceren må drive med den naturlige gradient. En fuld gennemgang af den simple grundvandsmodel fremgår af appendiks F.

Den simple model opbygges i 3D. Da filterstørrelsen og placering er tilnærmelsesvis ens for boring 34. 2289 og 34. 2290, er det valgt at tage udgangspunkt i boring 34. 2289. Modellen er opsat med følgende input:

- 1. Netto nedbør, bestemt ud fra en middel årlig nedbørsmængde og fordampning.
- 2. Hydraulisk gradient, bestemt ud fra potentialekort.
- Hydraulisk ledningsevne, bestemt ud fra en Cooper-Jacobs test på boring 34. 1696 og 34. 1736. Beregningerne er vedlagt i bilag E.5.4.

- 4. Anisotropi, bestemt med udgangspunkt i værdier fra strømningsforsøget i kapitel 3. Jo større anisotropi desto mindre spredning vil der forekomme mellem lagene, hvorfor det betragtes som en sikkerhedsfaktor at sætte denne i den lave ende af intervallet.
- 5. Effektiv porøsitet, bestemt ud fra tabelværdier. Dette gøres, da forsøget er udført før forsøget på mellem skala afsluttedes.

Grundet usikkerheden ved bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne, effektiv porøsitet samt anisotropien i området opstilles flere modeller med forskellige parametersæt. Ansøgningen til kommunen har været udført forinden stoftransportforsøget på mellem skala var udført, hvorfor den øvre værdi for den effektive porøsitet er valgt høj. Inputtene til modellerne fremgår af tabel 5.2.

Tabel 5.2: Parameteroversigt benyttet i den opstillede grundvandsmodel. *Cooper-Jacobs testen knytter sig kun til $3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Den øvre værdi for den hydrauliske ledningsevne er valgt ud fra usikkerhed på bestemmelsen ved Cooper-Jacobs testen.

Parameter	Værdi	Bestemmelsesmetode
Netto nedbør	300 mm/år	Skøn
Hydraulisk gradient	$0,0025 \frac{\text{m}}{\text{m}}$	Potentialekort
Hydraulisk ledningsevne	$3 \cdot 10^{-4} \text{ og } 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Cooper-Jacobs test*
Anisotropi	1 og 5	Lille skala forsøg
Effektiv porøsitet	0,01 og 0,1 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$	Tabelværdier, lignende kalk

Efter simuleret MODFLOW tilføres partikelbaner, og stagnationspunktet registreres. Ved brug af Darcys formel beregnes Darcy hastigheden, som omregnes til en porevandshastighed. Ud fra drivelængde og porevandshastighed bestemmes tiden, det vil tage for kloridfanen at nå stagnationspunktet. Resultater fra de forskellige modelkørsler ses i tabel 5.3.

 Tabel 5.3: Oversigt over beregnede drive-længder og tilhørende tider for forskellige parametersæt.

 Drive-tiden markeret med rød er den mindste tid bestemt.

Hydraulisk ledningsevne	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$3 \cdot 10^{-4}$				
Anisotropifaktor	[-]	1		1 5		5
Effektiv porøsitet	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	0,01	0,1	0,01	0,1	
Darcy hastighed	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-6}$	
Drive-længde	[m]	11,0	11,0	14,0	14,0	
Drive-tid	[t]	40,7	407,4	51,9	518,5	

Hydraulisk ledningsevne	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$3 \cdot 10^{-3}$				
Anisotropifaktor	[-]	1		1 5		5
Effektiv porøsitet	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	0,01	0,1	0,01	0,1	
Darcy hastighed	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	
Drive-længde	[m]	1,9	1,9	2,2	2,2	
Drive-tid	[t]	0,7	7,0	0,8	8,1	

I tabel 5.3 ses det, at hvis den hydrauliske ledningsevne er $3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, så vil drive-længde og -tid være meget større end, hvis den hydrauliske ledningsevne blot er en faktor 10 større. Det kan således forekomme, at transporten af traceren sker meget hurtig, hvorfor dataloggeren skal tilses ofte således, at traceren ikke driver uden for boringens indvindingsopland.

5.3.2 Praktisk udførelse

For at sikre, at forsøget forløber efter hensigten udføres en arbejdsplan, se bilag E.5.3. Ved forsøgets start opstilles udstyr på lokaliteten. Forsøgsopstillingen er illustreret på figur 5.6 og vist på figur 5.7. Udførelsen af forsøget forløber på følgende vis i felten:

- Nærliggende indvindingsboringer til moniteringsboringer sættes ud af drift en til to dage før forsøget startes for at hindre, at boringers indvinding påvirker forsøget. Grundet Drastrup kildeplads' vigtige rolle har Aalborg Forsyning, Vand A/S kun tilladt, at tre boringer tages ud af drift i forsøgsperioden. På dette grundlag er det valgt at tage boringer 34. 1697, 34. 1698 og 34. 1670 ud af drift to dage før forsøgets start.
- 2. To palletanke af 1 m³ opstilles tæt ved boring og fyldes med vand fra boringen før forsøgets start. Heraf anvendes tank 1 til saltvand (tracer), og tank 2 som rentvandstank (chaser).
- 3. 2 kg NaCl tilsættes vandet i tank 1 svarende til en kloridkoncentration på 1,2 %.
- 4. Der benyttes en Aqua TROLL 200 fra In-Situ Inc. til at logge temperatur, tryk og aktuel ledningsevne. For specifikationer mht. udstyret henvises til In-Situ Inc. (2011). Aqua TROLL 200'en sænkes ned i tank 1 for at måle aktuel ledningsevne af traceren.
- 5. Pumpen fra filter 1 løftes op på en presenning og Aqua TROLL 200'eren føres ned i boringen under pumpen. Aqua TROLL 200'en monteres således i toppen af filter 1, hvorved koncentrationen kun logges i det dybeste filter.
- 6. Diveren stripses fast således, denne ikke flytter sig.
- 7. Diveren startes for at logge den naturligt forekomne tilstand (baggrundskoncentration og tryk). Der logges hvert andet minut.
- 8. Der monteres to flytbare pumper i tank 1 (en pumpe til at pumpe vand ned i hvert filter), og det kontrolleres, at pumperne fungerer. De to flytbare pumper benyttes ligeledes til at skabe cirkulation i tanken.
- 9. Tidspunktet noteres og tilførslen af traceren startes i den respektive boring.
- 10. Hvert filter tilsættes 0,5 m³ saltvand og 0,5 m³ rent vand. Denne mængde tracer og chaser er bestemt ud fra vandmængden i boringerne.
- 11. Løbende noteres vandstanden i tanken for at bestemmes størrelsen af flowet.
- 12. Når traceren er tilføjet noteres tidspunktet, og de to flytbare pumper flyttes over i tank 2 (rentvandstank).
- 13. Tidspunktet noteres og tilførslen af chaser startes til den respektive boring.
- 14. Når tank 2 er tom monteres de to flytbare pumper samt en ekstra pumpe i tank 1. Pumperne benyttes til at transportere vandet ved tilbagepumpningen væk fra området.
- 15. Tracer og chaser lades drive med den naturlige gradient. Løbende kontrolleres det, hvornår den opstrøms side af "doughnuten" passerer boringen, illustreret på figur 5.2.
- 16. Når "doughnuten" har drevet med den naturlige gradient i ca. to gange tiden, som det tager "doughnuten" at passere boringen, påbegyndes tilbagepumpningen med de to fastmonterede pumper. De fastmonterede pumper pumper vandet op i tank 1, hvor de tre flytbare pumper pumper vandet 30m væk fra boringen, se figur 5.4 for udledningsområder.
- 17. Tilbagepumpningen fortsættes indtil baggrundskoncentrationen er opnået dog maksimalt 12 timer.



Figur 5.6: Principskitse af forsøgsopstillingen i felten. Pumpe samt slange i tank 2 er samme udstyr, som der benyttes i tank 1. Begge boringer har to filtre, hvor der i begge filtre injiceres hhv. 0,5 m³ tracer og 0,5 m³ chaser.



Figur 5.7: Forsøgets opstilling i Drastrup ved boring 34. 2289.

^{5.} Strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala

5.4 Analyse af måledata

I dette afsnit præsenteres og analyseres dataene, som er målt med Aqua TROLL 200'en i boringerne ved de to forsøg.

I forbindelse med forsøget er det fundet, at på trods af at de tre nærmeste boringer, boring 34. 1697, 34. 1698 og 34. 1670, har været taget ud af drift, er begge forsøg blevet påvirket af andre indvindingsboringer. Ved sammenligning af pumpeperioder og måledata fra diveren er det kommet frem til at særligt boringerne 34. 1995, 34. 1996, 34. 2364 og 34. 2366 har påvirket forsøgene. De lukkede boringer, og boringerne som har påvirket forsøgene, ses på figur 5.8.



Figur 5.8: Placeringer af lukkede boringer og boringer, som har påvirket forsøgene. (Aalborg Universitet, 2004)

Grundet, at disse boringer har påvirket forsøgene, forekommer de målte koncentrationsforløb anderledes end det forventede forløb illustreret i afsnit 5.1. Måledata fra vandforsyningen findes i bilag E.5.6.

5.4.1 Målt koncentrationsforløb ved forsøg på boring 34. 2289

Forsøget på boring 34. 2289 opstilles fredag d. 09/03, men forsøget igangsættes først mandag d. 12/03. Nær boring 34. 2289 er fire boringer, som ikke har været standset i forsøgsperioden og har påvirket forsøget:

- Boring 34. 2364 Indvindingsboring, flow på 33 $\frac{m^3}{t}$
- Boring 34. 2366 Indvindingsboring, flow på 37 $\frac{m^3}{t}$
- Boring 34. 1695 Afværgeboring, flow på 13 $\frac{m^3}{t}$
- Boring 34. 1696 Afværgeboring, flow på 9,5 $\frac{m^3}{t}$

På figur 5.9 ses en tidslinje over forsøgsperioden og tidspunkter for, hvornår nærliggende boringer har haft pumpestart og -stop. Det skal bemærkes, at afværgeboringerne ikke er medtaget i tidslinjen, da disse kører hele tiden.



Figur 5.9: Tidslinje for push-pull forsøget på boring 34. 2289. Boring 34. 1695 og 34. 1696 fremgår ikke, da disse kører i hele perioden.

Det skal bemærkes, at ved injicering af chaseren stopper den flytbare pumpe til filter 1 i en periode på ca. fem minutter. Ved modellering af forsøget tages der højde for dette.





Figur 5.10: Måledata fra forsøg på boring 34. 2289. Det bemærkes, at der forekommer to peaks. Af illustrative grunde illustreres et udsnit af hele forløbet på den sekundære akse (Udklip).

Ved sammenligning med det forventede forløb på figur 5.3 ses det, at koncentrationsforløbet afviger markant. Det første som bemærkes er, at den aktuelle ledningsevne, når traceren passer boringen, kun er ca. 8% af, hvad den er ved nedpumpning af traceren. Dette indikerer, at traceren allerede er

meget fortyndet, når den er kommet hertil. Det andet som bemærkes er, at den aktuelle ledningsevne ikke kommer helt ned på baggrundskoncentration efter traceren er blevet pumpet ned. Det tyder på, at traceren ikke bliver presset helt ud af boringen. Dette kan være forårsaget af, at pumpen står af ved nedpumpning af chaseren i dette filter. Det tredje som er bemærket er, at der forekommer to peaks med tilnærmelsesvis samme højde. Årsagen til dette kan skyldes:

- Sprækkernes placering og orientering har en indflydelse på vandtransporten. Første peak kan skyldes den transport af stof der sker fra de sprækker, der løber parallelle med gradientens retning, og andet peak kan beskrives ved de sprækker, der har en anden orientering, således stoffet ikke transporteres direkte forbi boringen.
- De to nærliggende indvindingsboringer starter begge omkring kl. 20:00 d. 12/03, og mobiliserer derfor ekstra vand omkring boringen, hvilket resulterer i, at den målte koncentration er yderligere fortyndet. Ved pumpestop kl. 02:00 d. 13/03 ses det, at koncentrationen igen peaker. Det kan således konkluderes, at de nærliggende pumper har en indflydelse på den målte koncentration.

Ved start af tilbagepumpning bemærkes det, at der forekommer en momentan stigning i koncentration, hvorefter koncentrationen falder til baggrundskoncentrationen. Det kan tyde på, at sprækker nær forsøgsboringen tømmes for saltvand, hvorved traceren ikke har forladt boringens indvindingszone, men bare er blevet fortyndet.

5.4.2 Målt koncentrationsforløb ved forsøg på boring 34. 2290

Forsøget på boring 34. 2290 opstilles onsdag d. 14/03, men forsøget igangsættes først torsdag d. 15/03. Ved kontrol af trykket i boringen findes, at indvindingen fra boring 34. 2855 ikke har nogen indflydelse på trykket i boringen, se figur 5.4 for placering. Herimod har indvindingen fra de hhv. to indvindings- og afværgeboringer en påvirkning.

På figur 5.11 ses en tidslinje over forsøgsperioden og tidspunkter for, hvornår nærliggende indvindingsboringer har pumpestart og -stop.



*Figur 5.11: Tidslinje for push-pull forsøget på boring 34. 2290. Boring 34. 1695 og 34. 1696 frem*går ikke, da disse kører i hele perioden.

Det bemærkes, at dette forsøg forløber uden problemer med de flytbare pumper. Måledataene er plottet på figur 5.12.



Figur 5.12: Måledata fra forsøg på boring 34. 2290. Det bemærkes, at der forekommer to peaks. Af illustrative grunde illustreres et udsnit af hele forløbet på den sekundære akse (Udklip).

Det ses, at ligeledes ved dette forsøg at den aktuelle ledningsevne er meget reduceret fra, når traceren injiceres i boringen til denne passerer boringen. I dette tilfælde er ca. 10% af den injicerede målte aktuelle ledningsevne, når traceren passer boringen. Efter injicering af chaser ses det, at baggrundskoncentrationen ikke opnås ligesom ved det første forsøg. Når traceren passerer boringen forekommer der to små peaks, som kan være forsaget af sprækkestruktur og fortynding ved påvirkning fra pumper, som beskrevet tidligere. Før tilbagepumpningen startes kan et mindre peak antydes. Dette skyldes, at boring 34. 2364 er slukket, og der ikke længere mobiliseres vand som ellers er immobilt. Ved dette forsøg ses der herved ingen indikation på traceren ved tilbagepumpning, hvorfor det er muligt, at den er blevet transport udenfor boringens indvindingszone eller at den ligeledes er blevet fortyndet, så den ikke er målbar i forhold til baggrundskoncentrationen.

5.4.3 Sammenligning af måledata fra de to forsøg

For at give en bedre vurdering af forsøgenes data plottes begge grafer på samme figur, se figur 5.13. For at sammenligne de to forsøg omregnes den aktuelle ledningsevne til en relativ koncentration i forhold til koncentrationen i tank 1 (traceren), og begge grafer plottes efter start på injicering af tracer. Det antages herved en lineær sammenhæng mellem den relative koncentration og den aktuelle ledningsevne.

Det fremgår af figur 5.13, at de to forsøg ikke har samme form. Der forekommer dog visse ligheder, nemlig kurvens forløb. Ved injicering af traceren opnås tilnærmelsesvis samme koncentration i boringen. Efter første peak sker et dyk, og andet peak danner form. I begge tilfælde er bredden på første peak og andet peak af samme størrelse, og andet peak har en tendens til at være lavere end første peak i den relative koncentration. Umiddelbart synes forskellen mellem de to forsøg at være på hastigheden, hvormed koncentrationen måles. Forskellen skyldes derfor en variation i den hydrauliske gradient i området. Ved boring 34. 2289 er terrænet fladt, og det forventes således, at gradienten er stærkt påvirket af pumperne. Nedstrøms for boring 34. 2290 hælder terrænet, og det forventes således, at gradienten her er væsentligt højere.



Figur 5.13: Måledata fra forsøg på boring 34. 2289 og boring 34. 2290.

For at vurdere hvilken indflydelse de nærliggende pumper har på moniteringsboringerne plottes trykket for de to boringer på figur 5.14. Det fremgår, at ændringen i den relative koncentration sker ved begge forsøg, når en af de to indvindingsboringer starter, og derved mobiliserer ekstra vand. Denne tendens er mere tydelig ved forsøget på boring 34. 2289, da boringerne ligger tættere herved.



Figur 5.14: Udklip fra de to udførte forsøg samt ændringer i tryk.

For efterfølgende at kunne modellere forsøgene noteres følgende betragtninger:

Trykhøjde

Ændringen i trykhøjden ved injicering af tracer og chaser er tilnærmelsesvis den samme i begge boringer. Af dette kan det konkluderes, at gruskastningen og kalken omkring begge boringer er af samme karakter. Ligeledes kan det konkluderes, at den hydrauliske ledningsevne for de to forsøg er ens.

Nærliggende boringer

Trykhøjderne ved begge forsøg er stærkt påvirket af de to nærliggende indvindingsboringer. Det kan således ikke negligeres, at boringerne har en indflydelse på de bestemte parametre.

De nærliggende boringer synes ligeledes at have en indflydelse på koncentrationsforløbet. Dette skyldes, at der ved pumpestart mobiliseres noget af vandet omkring boringen, hvilket vil skabe en fortynding af koncentrationen. Dette fænomen er en anelse forskudt ved 34. 2290, hvilket kan skyldes en øget afstand imellem indvindingsboringerne og moniteringsboringen.

Koncentrationsforløbet

Ses der bort fra tidsperioden, som forsøgene forekommer over, har de to koncentrationsforløbet en lighed. Begge forsøg påvirkes af indvindingsboringerne, så der fremgår to peaks ved begge forsøg. Det forventes, at eneste variation ved de to forsøg skyldes en ændring i gradienten grundet konjukturen i oplandet, samt beliggenheden i forhold til indvindingsboringerne.

5.5 Modellering af forsøg

For at bestemme de hydrogeologiske parametre modelleres forsøgenes gennembrudskurve. Det gøres med udgangspunkt i den tidligere beskrevne simple grundvandsmodel, da traceren kun får lov at drive nogle få meter, og den geologiske kompleksitet derfor er begrænset til kun at være kalk. Det er valgt ikke at medtage indvindingsboringer i modellen pga. øget simuleringstid. Herved vil gradienten i modellen blive større end den naturlige hydrauliske gradient, hvilket blot afspejler pumpernes påvirkning. Ved ikke at medtage pumperne er det ikke muligt at skabe to peaks ved modelleringen. Modellen laves transient med forsøgets stress perioder for injicering af tracer og chaser, drive periode og tilbagepumpning.

Som tidligere nævnt er det valgt at modellere forsøgene uden dobbelt porøsitet eller sorption. Dette er valgt, da det forventes, at tilbageholdelsen af klorid i den immobile fase er meget lille grundet forsøgenes tidsperioder på under 24 timer. Forsøget på boring 34. 2289 strækker sig over 22 timer. Ved brug af BEST ligningen præsenteret i afsnit 4.5.3 findes, at 75% af koncentrationen findes 3,7 mm inde i matricen. Dette understøtter således, at tilbageholdelsen er minimal.

5.5.1 Fitting af data

Ved fitting af modeldata til måledata lægges der vægt på, at modellen passer i tid. Da koncentrationen udelukkende fittes til et relativ koncentrationsforløb ses der bort fra massen. Modellen opstilles derfor til at passe i tiden, hvilket gøres ud fra tidslinjerne (negligeret indvinding fra andre pumper). Grundet, at der ikke ses et peak ved tilbagepumpningen (se det forventede forløb, figur 5.3) er det ikke muligt at benytte ligning (5.1) til bestemmelse af den effektive porøsitet. Denne indgår derfor som en kalibreringsfaktor. Data fra modelgennemkørslerne findes i bilag E.5.7.

For at få en fornemmelse af parametrenes størrelsesorden samt indvirkning på modellens gennembrudskurve, laves først en analyse af hver parameters indflydelse på koncentrationsforløbet.

• Hydraulisk ledningsevne

Den hydrauliske ledningsevne bestemmes ved at fitte trykhøjden i modellen til den målte trykhøjde, når tracer og chaser injiceres i boringen. Der tages udgangspunkt i en hydraulisk ledningsevne på $3,04 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, som er bestemt ved en Cooper-Jacob test beskrevet ved den simple modelopbygning. Det skal dog bemærkes, at den effektive porøsitet i kalken og porøsiteten i cellen, hvor boringen sidder i modellen, ligeledes har indflydelse på trykhøjden. Det er dog den hydrauliske ledningsevne, som har den primære indflydelse. Det findes, at den hydrauliske ledningsevne for begge forsøg er $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

På figur 5.15 ses den hydrauliske ledningsevnes indvirkning på gennembrudskurven. Det ses, at den hydrauliske ledningsevne benyttes til at få stoftransporten til at ske hurtigere eller langsommere i kalken.



Figur 5.15: Gennembrudskurver med tre forskellige hydrauliske ledningsevner.

• Gradient

Den naturlige hydrauliske gradient i området er bestemt ud fra et potentialekort fra 2005, se tabel 5.4. Det fremgår, at der kan forekomme en stor variation i gradienten. Ydermere etablerede Aalborg Forsyning, Vand A/S tre nye boringer ved Drastrup kildeplads 1. Boringerne 34. 2855, 34. 2858 og 34. 2365 blev etableret i årene 2005 - 2006, og disse forventes derfor ikke at have været taget i brug, da potentialekortet blev udført. Det forventes derfor, at grundvandspotentialet på nuværende tidspunkt har ændret sig.

Som tidligere beskrevet medtages indvindingsboringerne, som har påvirket forsøgene ikke i modellen. Det forventes derfor heller ikke, at modellens naturlige hydrauliske gradient afspejler den naturlige gradient i området, men at den er større. Som udgangspunkt for gradienten benyttes dog de bestemte naturlige hydrauliske gradienter fra potentialekortet.

Tabel 5.4: Gradient opstrøms og nedstrøms for boringerne 34. 2289 og 34. 2290.

	34. 2289	34. 2290
Gradient, opstrøms $\left[\frac{m}{m}\right]$	0,0010	0,0011
Gradient, nedstrøms $\left[\frac{m}{m}\right]$	0,0022	0,0020

På figur 5.16 ses gradientens indvirkning på gennembrudskurven. Som forventet har gradienten samme effekt på koncentrationsforløbet, som den hydrauliske ledningsevne.



Figur 5.16: Gennembrudskurver med tre forskellige gradienter.

• Anisotropi $\left(\frac{K_h}{K_V}\right)$

Anisotropien er vurderet ud fra kapitel 3. Det findes, at anisotropien ligger i intervallet 1 - 127. Anisotropien er høj, da forsøgene udføres på prøver af 5 cm. Spitz og Moreno (1996) har fundet, at anisotropifaktoren for kalk er 2. På baggrund af dette vælges faktoren til 10. Parameteren har en indvirkning på den vertikale stoftransport, men parameteren har kun en mindre påvirkning på koncentrationsforløbet. Anisotropifaktoren forventes at være ens ved begge forsøg.

På figur 5.17 ses anisotropiens indvirkning på gennembrudskurven. Ved større anisotropifaktor fortyndes stoffet, hvilket er modsat af, hvad der rent teoretisk er forventet. Det forventes, at ved en lav anisotropifaktor vil den relative koncentration mindskes, da der burde forekomme en større udveksling af stof på tværs af lagene. Dette burde især være tilfældet i toppen af filter 1, da det overliggende vand forventes at fortynde koncentrationen. Teoretisk set burde dette ikke være muligt.



Figur 5.17: Gennembrudskurver med tre forskellige anisotropi faktorer.

• Effektiv porøsitet

Den effektive porøsitet er i kapitel 4 bestemt til $0.03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Den effektive porøsitet formodes at være af samme størrelse for de to forsøg.

På figur 5.18 ses den effektive porøsitets indvirkning på gennembrudskurven. Den effektive porøsitet har, som forventet, nogenlunde samme effekt som den hydrauliske ledningsevne og gradienten, men i modsætning til disse har den effektive porøsitet en stærkere tendens til at øge koncentrationen i alle målepunkter. Ligeledes har den effektive porøsitet en indvirkning på koncentrationen lige efter chaseren er injiceret.



Figur 5.18: Gennembrudskurver med tre forskellige effektive porøsiteter.

Den effektive porøsitet i boringen benyttes ydermere som en kalibreringsfaktor. Dette skyldes, at der i boringens filtre kun findes vand, hvilket vil resultere i en større effektiv porøsitet i disse celler i modellen. Da alle filtrene er af dimensionen Ø125 og cellen i modellen, hvor boringen er placeret, har størrelsen 12,5 x 12,5 cm, burde den effektive porøsitet i cellerne, hvor boringen er, være omkring $0,80 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

På figur 5.19 ses indvirkning af den effektive porøsitet i boringen på gennembrudskurven. Det fremgår, at den effektive porøsitet i boringen har en markant indvirkning på koncentrationsforløbet. Ved en øget effektiv porøsitet i cellen med boringer flader koncentrationskurven mere ud.



Figur 5.19: Gennembrudskurver med tre forskellige effektive porøsiteter i boringen.

• Longitudinal dispersivitet

Den longitudinale dispersivitet er en diffus parameter i en numerisk model. Dette skyldes, at størrelsesordenen på den numeriske dispersion afhænger af cellestørrelsen. I kapitel 4 bestemmes dispersiviteten til 1 cm ved en cellestørrelse på 1 x 1 x 1 cm. Boringens cellestørrelse er i det pågældende forsøg 12,5 x 12,5 x 100 cm, og den numeriske dispersion forventes derfor at være større. Dispersiviteten er som udgangspunkt valgt til 10 cm i strømningsretningen, og 1 cm på tværs af strømningsretningen.

På figur 5.20 ses indvirkning af den longitudinale dispersivitet på gennembrudskurven. Ved en mindre dispersivitet spredes koncentrationen ikke ud, hvorfor kurven indsnævres. Den longitudinale dispersivitet har en stor indflydelse på den relative gennembrudskoncentration, når chaseren injiceres.



Figur 5.20: Gennembrudskurver med tre forskellige longitudinale dispersiviteter.

Ovenstående parametre benyttes til at fitte modellerne til måledata.

5.6 Antagelser

I forbindelse med udførelsen samt modellering af forsøget er antagelser tilknyttet. Følgende afsnit er derfor opdelt i antagelser tilknyttet udførelsen og antagelser tilknyttet den konceptuelle forståelse til modelopbygningen.

5.6.1 Udførelse

Total opblandet salt

Før traceren injiceres benyttes rentvandspumperne til at skabe en cirkulation i tanken. Det antages derfor, at saltet er totalt opblandet i tankene, og at der derfor ikke vil forekomme en koncentrationsændring i det injicerede vand.

Pumpeydelser

Det blev fundet, at for filter 1 ved boring 34. 2290 var pumpeydelsen en anelse lavere end pumpeydelsen for filter 2. Dette er ikke medregnet.

Aktuel ledningsevne

Det antages, at den aktuelle ledningsevne udelukkende påvirkes af saltet fra forsøget. Reelt set har andre ioner også en indflydelse på den aktuelle ledningsevne. Ved omregning af den aktuelle ledningsevne i μ S til en relativ koncentration antages en lineær sammenhæng. Grundet tidspres mht. aflevering af Aqua TROLL'en er der ikke udført en standardkurve, men ved benyttelse af måledata fra forsøget samt forventede baggrundskoncentrationer findes en lineær sammenhæng. Data benyttet til at udføre den lineære regression findes i bilag E.5.8. Det fremgår af figur 5.21, at datagrundlaget for den lineære regression er dårligt, da der forekommer en mangel på punkter. Ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala er der dog benyttet en lignende elektrisk ledningsevnemåler ("manuelt EC-meter"). Standardkurve for det manuelle EC-meter er fundet til at være lineær, hvorfor det er valgt at antage, at Aqua TROLL 200'en ligeledes har en standardkurve, hvor der findes en lineær sammenhæng mellem den aktuelle ledningsevne og den relative koncentration.



Figur 5.21: Lineær regression imellem målte aktuelle ledningsevner og kloridkoncentrationer.

5.6.2 Konceptuel model

For at udføre modelleringen af forsøget er forsimplinger nødvendige. Rent konceptuelt dækker dette over:

Ens lag

Til trods for en mulig variation ned igennem dybden i mængden af sprækker, og hvor komprimeret laget er, modelleres alle lagene som værende ens. Der er således ikke taget højde for mulige sandlinser eller lignende. Dette skønnes ikke at have en stor effekt, da traceren i felten ikke transporteres mere end et par meter væk fra boringen, hvor der er konstateret kalk i hele dybden.

Porøsitet for filter og gruskastning

Ved modellering af forsøget er celler, hvor boringens to filtre sidder af størrelsen 12,5 x 12,5 x 100 cm. Disse celler tildeles en effektiv porøsitet på $1,0 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, se figur 5.22 for illustration.

Ved bestemmelse af den effektive porøsitet i boringen defineres porøsiteten i hele cellen, da der ikke tages højde for, at boringen er rund. Dette resulterer i, at den definerede størrelse på den effektive porøsitet i boringen i modellen er for lav i forhold til den virkelige porøsitet.



Figur 5.22: Tildeling af effektiv porøsitet i boring. Markerede celler indikerer de modellerede filtre i boringen.

Baggrundskoncentration

Baggrundskoncentrationen er i begge tilfælde antaget til at være konstant. Dette anses for at være acceptabelt, da fluktuationerne i baggrundskoncentrationen er små i forhold til stofkoncentrationerne fra traceren.

Pumper

Det vælges, at modellere forsøgene uden at tage højde for nærliggende boringer. Dette skyldes, at ved modellering af boringer, som har en påvirkning på koncentrationsforløbet, vil tidsperioden for en modelgennemkørsel øges markant. For at mindske fittingprocessen, men samtidig få et acceptabelt bud på en hydraulisk ledningsevne og effektiv porøsitet negligeres de to indvindings- og afværgeboringer.

5.7 Resultater

Ved fitting af dataene kan parametrene tidligere beskrevet bestemmes. Data fra fittingsprocessen findes i bilag E.5.9. Fitningen af dataene foregår på følgende vis:

- 1. Trykhøjden i boring i modellen fittes ved at justere den hydrauliske ledningsevne.
- 2. Den longitudinale dispersivitet tilpasses for at få den relative koncentration efter chaseren er injiceret til at passe.
- 3. Gradienten passes til for at få første peak til at passe med peaket på modellen.
- 4. Den effektive porøsitet samt den effektive porøsitet i boringen tilpasses for at få den relative koncentration til at passe.
- 5. Finjustering af parametre.

Nedenfor præsenteres fitningerne for hvert forsøg.

5.7.1 Boring 34. 2289

På figur 5.23 ses det, at modelleringen i GMS afspejler ikke transporten korrekt, da koncentrationsgennembruddet sker lige efter injiceret tracer. Måledata viser, at gennembruddet sker efter ca. 5 timer. Fitningen foregår således efter peakets højde samt fitting af arealerne under kurverne.



Figur 5.23: Fitting af gennembrudskurve til måledata for boring 34. 2289.

Parametersættet for modellen for boring 34. 2289 er vist i tabel 5.5. Det fremgår, at den effektive porøsitet er lavere end hidtil bestemt i strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala.

Tabel 5.5: Parametersæt fundet for boring 34. 2289 ved fitning til måledata.



5.7.2 Boring 34. 2290

Fitning af modellen til måledata fra forsøg på boring 34. 2290 foregår på samme vis som fitningen ved boring 34. 2289. Den relative koncentration målt i boring 34. 2289 er højere end den relative koncentration målt i boring 34. 2289, hvilket jf. afsnit 5.5.1 må introducere en højere effektiv porøsitet. Som tidligere beskrevet vurderes kalken dog at have samme karakteristik ved begge boringer, hvorfor den eneste variabel burde være gradienten. Fitningen er vist på figur 5.24.



Figur 5.24: Fitting af gennembrudskurve til måledata for boring 34. 2290

Parametersættet for modellen ved 34. 2290 er vist i tabel 5.6. Det fremgår, at gradienten for forsøget er høj i forhold til den forventede værdi. Den øgede gradient i forhold til forsøget på boring 34. 2289 skyldes, at der ved boring 34. 2290 forekommer en større hældning i terrænet, hvilket kan påvirke gradienten.

Tabel 5.6. Parametersat	fundet fo	or horing 34	2290 ved f	fitnino til måledata
Tuber 5.0. Turumeterster	junuei jo	n boring 54.	2290 veu j	uning in maleaala.



5.7.3 Sammenligning af forsøgsresultater

For at sammenligne og diskutere de valgte løsninger til de to forsøg samles parametersættene i en tabel, se tabel 5.7.

Tabel 5.7: Sammenligning af parametersæt fundet ved fitning til forsøget ved boring 34. 2289 og boring 34. 2290.

	34. 2289	34. 2290
$K_s \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$\frac{dh}{dl}$ $\begin{bmatrix} m\\m \end{bmatrix}$	0,001	0,004
$\frac{K_h}{K_v}$ [-]	10	10
$\theta_{eff} \left[\frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}} \right]$	0,0085	0,0185
$\theta_{eff, boring} \left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}} \right]$	1,0	1,0
$\tau_D [m]$	0,15	0,15

Det fremgår af tabel 5.7, at parametersættene for de to forsøg har mange ens parametre. Parametrene har endvidere en lighed med parametre bestemt af Claes (2011).

Den hydrauliske ledningsevne er som tidligere beskrevet den primære parameter, der har en indflydelse på trykhøjden i boringen ved injicering af tracer og chaser. Da trykhøjden introduceret ved nedpumpning ved de to forsøg er af samme størrelse måtte det således forventes, at den hydrauliske ledningsevne ville være af samme størrelse. Det fremgår af tabel 5.7, at den hydrauliske ledningsevne for begge forsøg er bestemt til $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket i modsætning til tidligere bestemte hydrauliske ledningsevne ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala synes høj. Den hydrauliske ledningsevne bestemt på stor skala er ca. 2 dekader større, hvilket skyldes, at der ved forsøg på stor skala vil de store sprækker få en betydning.

Ydemere kan den markante afvigelse for den hydrauliske ledningsevne bestemt på mellem og stor skala tilskrives, at vandtransporten i felten har eroderet store sprækkesystemer, hvorimod den udtagne intaktprøve er fra den umættede zone, og hovedsprækkerne er derfor formegentligt ikke eroderede i den horisontale retning. Det kan ligeledes tænkes, at kalken omkring boringen er blevet påvirket ved etableringen af boringen. Dette vil således kunne introducere en højere hydraulisk ledningsevne.

Gradienten i området er svær at bestemme grundet indflydelsen fra de nærliggende indvindingsboringer. Det fremgår dog af de to modeller, at gradienten i området er stejl. Dette skyldes, at indvindings- og afværgeboringerne i området ikke er medregnede. Havde indvirkningen af disse været inkluderet i modellen, ville den bestemte naturlige gradient have været lavere. Det fremgår, at gradienten ved forsøg 34. 2290 er væsentligt højere end gradienten ved forsøg 34. 2289. Ved forsøgsudførelsen er der observeret en ændring i terrænniveauet ved forsøg 34. 2290, hvilket kan introducere en stejlere gradient.

Anisotropien er som udgangspunkt valgt til en faktor 10. Af Spitz og Moreno (1996) fremgår en anisotropifaktor i kalk på 2, og en faktor i sprækket kalk til 500. Sidstnævnte værdi er dog for bjergarter med en synligt stor sprækkestruktur, hvorfor det formodes, at en anisotropifaktor ligger nærmere de 2.

Den effektive porøsitet er valgt på baggrund af den tidligere bestemte for strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala på $0,03 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Det fremgår, at den effektive porøsitet ved forsøgene ligger nær denne værdi. Den effektive porøsitet er bestemt en anelse lavere end ved strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala, hvilket kan skyldes, at der ved denne effektive porøsitet også tages højde for en eventuel mindre udveksling mellem sprækker og matrice. Den effektive porøsitet ville optimalt set være bestemt ud fra tidshorisonten for tilbagepumpningen af massen, men pga. for stor fortynding har det ikke været muligt at skelne den målte koncentration fra baggrundskoncentrationen ved tilbagepumpningen.

Den effektive porøsitet i boringen er valgt som en kalibreringsparameter, da gruskastningen omkring boringen er ukendt. Det viser sig, at den effektive porøsitet omkring boringen har en stor indflydelse på koncentrationsforløbet. Det er tidligere beskrevet, at det forventedes, at den effektive porøsitet i boringen skulle være $0.80 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Den er bestemt til $1.0 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvilket skyldes, at gruskastningen sandsynligvis har en højere effektive porøsitet end kalken. Da boringerne er udført af samme brøndborer forventes det, at den effektive porøsitet i boringen er ens, hvilket også fremgår af tabel 5.7.

Den longitudinale dispersivitet er som tidligere nævnt en diffus parameter, hvilket skyldes at udover den tildelte dispersivitet i modellen forekommer der en numerisk dispersion, som afhænger af cellestørrelsen. Da denne models mindste celler har størrelsen 12,5 x 12,5 x 100 cm, forventes det, at den numeriske dispersion er stor, hvorved det forventes, at størrelsen på den tildelte longitudinale dispersivitet skal være lille. Det er således valgt at sætte den longitudinale dispersivitet til 15 cm, og 1,5 cm i de tværgående retninger.

5.8 Sammenfatning

Det kan på baggrund af det udførte forsøg vurderes, at med øget skala øges størrelsen af sprækkerne, hvilket således resulterer i en forøget hydraulisk ledningsevne. Grundet tidshorisonten af push-pull forsøget når de mellem og små sprækker ikke at påvirke transporten, men ved en tidshorisont over flere dage eller år får disse ligeledes en indflydelse, hvorved diffusionen ind i matricen vil få afgørende betydning. Forsøget udføres i modsætning til tidligere forsøg i marken på et dybereliggende kalklag, hvorved kalken er mere kompakt, så til trods for en større sprækkestruktur findes den effektive porøsitet mindre. Der er således blevet bestemt en hydraulisk ledningsevne på ca. $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ og en effektive porøsitet på ca. $0,014 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$ for kalken i Drastrup området.


parameterbestemmelse

I dette kapitel samles og sammenlignes de bestemte hydrogeologiske og stoftransport parametre ved de udførte forsøg på lille, mellem og stor skala. Endvidere sammenlignes disse med anden litteratur for kalk i Aalborg området. Følgende kapitel kan derfor benyttes som opslagsværk for parametrene bestemt ved strømnings- og stoftransportforsøg på kalk i Aalborg området. På denne baggrund drages en konklusion for hver parameter i forhold til dens værdisættelse i en tredimensional grundvandsmodel for Drastrup.

6.1 Præsentation af anden litteratur

For at sammenligne de bestemte hydrogeologiske og stoftransport parametre fra nærværende projekt med anden litteratur, beskrives nedenfor de anvendte kilder og deres forsøgslokalitet og -skala. Figur 6.1 viser lokaliteterne beskrevet nedenfor.

- Mortensen og Lorenzen (1999)

Afgangsprojekt ved Aalborg Universitet. Mortensen og Lorenzen har udført strømningsforsøg på lille skala på kalk fra Mjels. Forsøget blev udført med stålcylindere med længde og diameter på 10cm, er herved skalaen lidt større end for det nærværende projekts strømningsforsøg på lille skala. Mortensen og Lorenzen udførte forsøget på intakte prøver, som blev udtaget på anden vis end i det nærværende projekt, dette er nærmere beskrevet i Mortensen og Lorenzen (1999).

- Thorsen (1992)

Artikel af Thorsen ved Aalborg Universitet. Thorsen har udført strømningsforsøg med intakt kalk fra Rørdal (nord-øst Aalborg), hvor Aalborg Portland indvinder kalk. Forsøget blev udført på tre skalaer; små cylindriske prøver med en diameter og længde på 6cm, tre kvadratiske blokke af størrelsen 30 x 30 x 30 cm og to kvadratiske blokke af størrelsen 75 x 75 x 75 cm. Heraf vides det ikke, hvorledes de små intakte prøver er blevet udtaget, men kalkblokkene er blevet udsavet på lignende vis som i nærværende projekt.

- Claes (2011)

Afgangsprojekt ved Aalborg Universitet. Claes udførte to slags forsøg, fem (2 vertikale og 3 horisontale) strømningsforsøg på lille skala og et strømnings- og stoftransportforsøg på stor skala. Strømningsforsøget på lille skala blev udført på intakt kalk, som blev udtaget ved at banke stålcylindere af samme størrelse som ved nærværende projekt, længde og diameter på 5 cm, ind i kalk lige under jordoverfladen på Eternitten i Aalborg. I forbindelse med udtagelsen er det blevet observeret, at udtagelsesmetoden introducerede revner i kalkprøverne samt at nogle af prøverne indeholdte sand i sprækkerne. Strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala blev ligeledes udført som push-pull forsøg dog på en lokalitet nær Skovstrup, 8 km syd for Aalborg.



Figur 6.1: Lokaliteterne, hvor projekts samt anden lokalitets forsøg udføres. (Aalborg Universitet, 2004)

6.2 Mættet hydraulisk ledningsevne

I tabel 6.1 ses de bestemte værdier for den mættede hydrauliske ledningsevne ved forsøg på forskellige skalaer. Disse er illustreret som funktion af skala på figur 6.2.

 Tabel 6.1: Hydrauliske ledningsevner bestemt i nærværende projekt samt anden litteratur. Variationen skyldes formegentligt forskellige udtagelsesmetoder samt forsøgets skala.

	Skala	Hydraulisk ledningsevne
	[cm]	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$
Sprækket kalk, Lille skala forsøg	5	$2,28 \cdot 10^{-4}$ - $2,90 \cdot 10^{-2}$
Sprækket kalk, Mellem skala forsøg	60	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Sprækket kalk, Stor skala forsøg	400	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Sprækket kalk, Mortensen og Lorenzen	10	$3,47 \cdot 10^{-6}$ - $2,43 \cdot 10^{-5}$
Sprækket kalk, Thorsen (blok prøver)	30 - 75	$1 \cdot 10^{-7}$
Sprækket kalk, Claes (små prøver)	5	$3,44 \cdot 10^{-6}$ - $2,56 \cdot 10^{-4}$
Sprækket kalk, Claes (push-pull)	550	$9 \cdot 10^{-4}$
Matrice, Mortensen og Lorenzen	10	$4,62 \cdot 10^{-8}$ - $2,08 \cdot 10^{-7}$
Matrice, Thorsen (små prøver)	6	$1 \cdot 10^{-12}$ - $1 \cdot 10^{-10}$

Sammenligning af nærværende projekts resultater

Det blev ved strømningsforsøget på lille skala fundet, at den mættede hydrauliske ledningsevne for de horisontale prøver lå i intervallet $3,04 \cdot 10^{-4} - 2,90 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, og for de vertikale prøver i intervallet $2,28 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} - 3,20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Det fremgår, at der er et udsving på to dekade fra laveste til højeste værdi, dette tyder på at de udtagende kalkprøver har været forholdsvis ensartet i forhold til mængden og størrelsen af sprækker.

For strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala blev det fundet, at den mættede hydrauliske ledningsevne var $2.6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Den mættede horisontale hydrauliske ledningsevne for kalkblok-

ken er således en til tre dekader lavere end de hydrauliske ledningsevner fra strømningsforsøget på lille skala. Dette kan skyldes, at sandsynligheden for at få gennemgående sprækker igennem en 60cm prøve er væsentligt lavere end sandsynligheden for at få gennemgående sprækker gennem en 5 cm prøve. Ydermere er det konstateret, at der ikke har været nogen randeffekt ved strømningsforsøget på mellem skala, hvor imod det er uvidende, om der har været en randeffekt ved strømningsforsøget på lille skala.

Ved GMS modelleringen af strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala blev en mættet hydraulisk ledningsevne bestemt til $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket er væsentligt højere end den hydrauliske ledningsevne bestemt på mellem skala. Afvigelsen kan skyldes forsøgenes skala. Ved strømningsforsøget på mellem skala er der observeret to niveauer af sprækkesystemer. Ved strømningsforsøget på stor skala forventes det, at et tredje niveau af sprækker træder i kraft, hvorved den hydrauliske ledningsevne forøges med halvanden dekade. Ydermere er det den longitudinale hydrauliske ledningsevne, som bestemmes på stor skala, da vandtransporten følger gradienten i området. Ved forsøget på mellem skala er kalkblokken udtaget fra den umættede zone, hvorved orienteringen af sprækkerne er uvist, det kan således forekommer, at forsøget på mellem skala er udført på tværs af hovedsprækker, hvilket vil give en mindre hydraulisk ledningsevne.

Sammenligning med anden litteratur

Mortensen og Lorenzen fandt en gennemsnitlig mættet hydraulisk ledningsevne i intervallet $4,62 \cdot 10^{-8} - 2,43 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ved forsøg på lille skala. Det fremgår ikke, om prøverne er udtaget horisontalt eller vertikalt. To værdier adskiller sig markant fra de restende ved at ligge to til tre dekader lavere end de resterende fire prøver. Det vurderes derfor, at disse to værdier repræsenterer et finere sprækkesystem, som kan ligestilles med ledningsevnen for matricen. Af denne betragtning vurderes den hydrauliske ledningsevne for sprækket kalk at ligge i intervallet $3,47 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} - 2,43 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Den hydrauliske ledningsevne for matricen vurderes således til at ligge i intervallet $4,62 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}} - 2,08 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, baseret på to prøver.

De fundne hydrauliske ledningsevner af Mortensen og Lorenzen er lavere end de bestemte hydrauliske ledningsevner ved nærværende projekts strømningsforsøget på lille skala. Dette kan blandt andet tilskrives, at Mortensen og Lorenzens forsøg er udført på en større skala, hvorved sandsynligheden for gennemgående sprækker mindskes. Ydermere er prøverne udtaget på anden vis, som kan have mindsket randeffekter. Mortensen og Lorenzen finder således en hydraulisk ledningsevne for sprækket kalk, som ligger nær værdien bestemt ved nærværende projekts strømnings- og stoftransportforsøg på mellem skala.

Thorsen har udført strømningsforsøg på lille skala med kalk fra Rørdal. Thorsen kommer frem til en hydraulisk ledningsevne for prøverne på ca. $1 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket er flere dekader lavere end værdierne bestemt ved nærværende projekt. Dette skyldes, at prøverne ikke indeholder nogen sprækker, hvilket indikeres af, at prøverne er fuldt vandmættede efter udtagelsen. Ydermere udfører Thorsen strømningsforsøg på kalkblokke af samme størrelsesorden som nærværende projekts forsøg på mellem skala. Thorsen finder en middel hydraulisk ledningsevne på $1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket er ca. to dekader lavere end, hvad der findes ved nærværende projekts forsøg på mellem skala. Forskellene må tilskrives udførelsesmetoden samt forskel i størrelsen af sprækker i den pågældende kalkblok.

Claes har ligeledes udført strømningsforsøg på små intakte prøver. Claes finder, at den hydrauliske ledningsevne ligger i intervallet $3,44 \cdot 10^{-6} - 2,56 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Dette er lavere end ledningsevnerne bestemt ved nærværende projekts forsøg på lille skala, også til trods for, at Claes har observeret, at kalkprøverne er sandholdige og revnede langs randen grundet udtagelsesmetoden. Ydermere har Claes udført et push-pull forsøg lig det nærværende projekts forsøg på stor skala. Claes bestemte en indvindingszone til 5,5 m nedstrøms, og den hydrauliske ledningsevne til $9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Denne hydrauliske ledningsevne er således bestemt på en væsentligt større skala end forsøgene på lille og mellem skala. Det fremgår, at den hydrauliske ledningsevne bestemt ved push-pull forsøget, ligesom ved nærværende projekts forsøg på stor skala, ligger en til flere dekader højere end den hydrauliske ledningsevne bestemt på mindre skalaer. Det kan således konkluderes, at den hydrauliske ledningsevne bestemt på lille og mellem skala er stærkt afhængig af prøvens indhold af sprækker og deres størrelse. Der forekommer således en stor variation, når den hydrauliske ledningsevne bestemmes på disse skalaer. Hvorimod, hvis den hydrauliske ledningsevne bestemmes på stor skala er variation mindre, da kalkens mængde af sprækker og sprækkernes størrelse bliver mere ensartet. Dette er illustreret på figur 6.2. På denne baggrund vurderes det, at den hydrauliske ledningsevne i Drastrups øvre kalklag er omkring $1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Figur 6.2: Skalaafhængigheden af bestemte hydrauliske ledningsevner. De to blå linjer indikerer tolkede intervaller for den hydrauliske ledningsevne ved en given skala.

6.3 Anisotropi

I tabel 6.1 ses de bestemte værdier for anisotropien, $\frac{K_{horisontal}}{K_{vertikal}}$, ved forsøg på forskellige skalaer.

	Skala	Anisotropi faktor
	[cm]	$\frac{K_h}{K_v}$
Lille skala forsøg	5	1 - 127
Claes, lille skala forsøg	5	0,3 - 75
Spitz and Moreno	-	2

Tabel 6.2: Anisotropifaktoren bestemt i nærværende projekt samt anden litteratur.

Anisotropien ved det nærværende projekts strømningsforsøget på lille skala er blevet bestemt til at ligge i intervallet 1 - 127. Claes finder ved strømningsforsøget på lille skala at anisotropien ligger i intervallet 0,3 - 75. Der er således en overensstemmelse mellem disse bestemmelser. Årsagen til det bredde interval skyldes, at prøverne er små, hvorved mængden af sprækker og deres størrelser er meget varierende, som omtalt under den mættede hydrauliske ledningsevne. Størrelsesordenen understøttes ligeledes af Spitz og Moreno (1996), som vurderer anisotropifaktoren til at ligge omkring 2 for kalk. Ved strømningsforsøget på stor skala fastlægges anisotropifaktoren til 10 grundet usik-kerheden ved strømningsforsøget på lille skala samt den bestemte værdi af Spitz og Moreno (1996). Anisotropifaktoren i Drastrup vurderes til at ligge omkring 10.

6.4 Porøsiteter

Til diskussion af bestemte porøsiteter opdeles afsnittet i tre underafsnit omhandlende den totale, effektive og immobile porøsitet. Alle porøsiteterne ses tabel 6.3.

	Skala Total porøsitet		Immobil porøsitet	Effektiv porøsitet
	[cm]	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{porer}}{\mathrm{cm}^{3}\mathrm{jord}}\right]$
Lille skala forsøg	5	0,38 - 0,46	-	-
Mellem skala forsøg	60	min. 0,38	0,29 - 0,47	0,03
Stor skala forsøg	400	-	-	0,0085 - 0,0185
Mortensen og Lorenzen	10	0,47	-	-
Thorsen	6	0,43 - 0,49	-	-
Claes, lille skala	5	0,40 - 0,55	0,29 - 0,42	0,09 - 0,26
Claes, stor skala	550	-	-	0,0185

Tabel 6.3: Sammenligning af hhv. totale, immobil og effektive porøsiteter.

Total porøsitet

Totalporøsiteten er i det nærværende projekt blevet bestemt i forsøget på hhv. lille og mellem skala. Ved forsøget på lille skala bestemmes totalporøsiteten til en middelværdi på $0,44 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ og totalporøsiteten for forsøget på mellem skala bestemmes vha. massebevarelse til mindst $0,38 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Herved vurderes det, at totalporøsiteten på de to skalaer er ens.

Mortensen og Lorenzen bestemmer en total porøsitet ved forsøget på lille skala til 0,47 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, og Thorsen bestemmer et interval for totalporøsiteten ved forsøg på lille skala til 0,43 - 0,49 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Dette stemmer fint overens med intervallet fundet i det nærværende projekts forsøg på lille skala.

Claes finder ved strømningsforsøg på lille skala, at den totale porøsitet ligger i intervallet $0,40 - 0,55 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Disse værdier ligger herved lidt højere end, hvad der er fundet i det nærværende projekt. Årsagen til forskellen kan være, at kalkprøverne i det nærværende projekt er udtaget 2 m under terræn, hvorimod Claes' prøver er udtaget lige under terrænniveau. Claes' kalkprøver kan derfor være mindre kompakte end prøverne i det nærværende projekt, og Claes' prøver kan have været udsat for mere intense regnhændelser, som kan have forårsaget erosion af sprækker, og derved skabt en større porøsitet.

Ved modellering af transporten af nitrat i Drastrup er den totale porøsitet uden betydning, og det konkluderes derfor blot, at denne ligger på ca. $0.44 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{iord}}$.

Effektiv porøsitet

I det nærværende projekt er den effektive porøsitet blevet estimeret ved strømningsforsøget på mellem og stor skala. Ved strømningsforsøget på mellem skala er den effektive porøsitet bestemt til $0,03 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Ved strømningsforsøget på stor skala tages der udgangspunkt i denne værdi ved fitting af model til de to forsøgs målte koncentrationskurver, og den effektive porøsitet justeres til at ligge i intervallet $0,0085 - 0,0185 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Årsagen til forskellen på den effektive porøsitet på de to skala kan skyldes, at kalkblokken, som benyttes til forsøget på mellem skala, er udtaget 2m under terræn, hvorved kalken ikke er så kompakt, som den er ca. 15m under terræn, hvor forsøget på stor skala udføres.

Claes bestemmer den effektive porøsitet på både lille og stor skala. Ved forsøg på lille skala finder Claes et interval på 0,09 - $0.26 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, hvilket er meget højere end værdierne fundet i det nærværen-

de projekt. Årsagen til, at Claes finder meget høje effektive porøsiteter, kan skyldes, at prøverne er sandholdige, samt kalkprøverne sprækker ved udtagelse. Ved forsøget på stor skala finder Claes en effektiv porøsitet på 0,0185 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ ved at se på tilbagepumpningen af massen. Det vurderes derfor, at den effektive porøsitet i det øvre kalklag ved Drastrup ligger på 0,01 - 0,02 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$.

Immobil porøsitet

Den immobile porøsitet er udelukkende bestemt ved stoftransportforsøget på mellem skala i det nærværende projekt, hvor det ved fitning af den numerisk model med dobbelt porøsitet findes et interval på 0,29 - 0,47 $\frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Det vurderes dog, at det er mest sandsynligt, at den immobile porøsitet ligger i den øvre del af intervallet. Da det er fundet nødvendigt at reducere den immobile porøsitet for at kompensere for modelfejl i den konceptuelle beskrivelse af stoftransporten.

Den immobile porøsitet er af Claes bestemt til 0,29 - 0,42 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Herved stemmer værdier overens med, hvad der er fundet i det nærværende projekt.

Det kan konkluderes, at kalken omkring Aalborg har samme karakteristik for porøsiteten.

6.5 Longitudinal dispersivitet

Den longitudinale dispersivitet er i det nærværende projekts forsøg på mellem skala bestemt til at være lille og er derfor sat til 1 cm ved den numeriske model med dobbelt porøsitet. Ved forsøget på stor skala er den longitudinale dispersivitet i modellen sat til 15 cm. Generelt er denne parameter usikkert bestemt, da der udover modellens mekaniske dispersion forekommer en numerisk dispersion, som afhænger af modellens cellestørrelse. Der kan derfor ikke laves en endelig konklusion for størrelsen af den longitudinale dispersivitet på baggrund af måledata.

Gelhar et al. (1992) har dog lavet en undersøgelse af den longitudinale dispersivitet, hvor det findes, at denne er afhængig af skalaen, grundet geologiske uregelmæssigheder. På figur 6.3 ses sammenhængen mellem den longitudinale dispersivitet og skala for kalkholdige jorde. De blå linjer på figuren er tolkede øvre og nedre grænser for dispersiviteten ud fra punkterne.



Figur 6.3: Den longitudinale dispersivitet som funktion af skala for kalk, sprækket kalk og andre sprækkede medier. Ud fra punkterne er en øvre og nedre grænse for dispersiviteten indlagt i form af blå linjer. (Gelhar et al., 1992)

Ud fra figuren ses det, at den longitudinale dispersivitet for forsøget på mellem skala (skala = 0.6 m) burde ligge i intervallet 0.06 - 3 m, hvor den i modellen er sat til 0.01 m. Årsagen til at den ligger i underkanten kan skyldes modellens numeriske dispersion, som kompenserer for den manglende mekaniske dispersion.

Ved forsøget på stor skala (skala = 4 m) burde den longitudinale dispersivitet ud fra figuren ligge i intervallet 0,2 - 10 m. Ligeledes ved dette forsøg er den longitudinale dispersivitet i modellen sat til at være i underkanten af intervallet, hvilket ligeledes skyldes den numeriske dispersion i modellen.

Ved modellering af strømninger og stoftransport i Drastrup er det nødvendigt med store celler i modellen for at minimere simuleringstiden, hvorved det forventes, at den numeriske dispersion i modellen er stor. På denne baggrund er det valgt ikke at sætte en yderligere mekanisk dispersion på modellen.

6.6 Tilbageholdelse af stof i kalkmatricen

Ved det nærværende projekts forsøg på mellem skala modelleres gennembrudskurver for klorid ved to former for beskrivelser af udvekslingen af stof mellem sprækker og matrice. Den første, hvor udvekslingen sættes ækvivalent til en retentionsfaktor, og den anden, hvor systemet beskrives ved en numerisk model med dobbelt porøsitet, hvor udvekslingen mellem de to faser afhænger af konstanten, mass transfer koefficienten.

Retentionsfaktor

Ud fra tiden for 50% gennembrud af klorid og transporttiden for vand blev en retentionsfaktor for hvert forsøg bestemt. Denne retentionsfaktor kan omregnes til en distributionskoefficient, K_d , som kan benyttes i den numeriske model med sorption, se tabel 6.4.

Forsøg	Skala	R	K _d
	[cm]	[-]	$\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}\right]$
1	60	11	$1,53 \cdot 10^{-4}$
2	60	6	$0,77 \cdot 10^{-4}$
3	60	1	0
4	60	9	$1,23\cdot10^{-4}$

Tabel 6.4: Beregnede K_d ud fra bestemte R i tabel 4.7.

Ved brug at disse retentionsfaktorer er det muligt at forudsige tiden for 50% gennembrud for 60cm kalk. I forbindelse med forudsigelsen af tidshorisonten for en effekt af den ændrede arealanvendelse i Drastrup, er det nødvendigt at være i stand til at forudsige, hvor stor tilbageholdelsen er over større afstande. Det kan i denne forbindelse forestilles, at retentionen kan opskaleres lineært med skalaen. Herved vil retentionen for stoftransport over 6m være en faktor 100. Denne overvejelse bringes i spil ved modelleringen af stoftransporten i Drastrup.

Mass transfer koefficient

Ved GLUE analysen af den numeriske model med dobbelt porøsitet i GMS findes det, at mass transfer koefficienten for stoftransportforsøget på mellem skala ligger i intervallet $0,0025 - 0,0029 \frac{1}{t}$, svarende til en sprækkeafstand i kalken på ca. 6 cm. Denne sprækkeafstand stemmer godt overens med observerede sprækkeafstande i kalkblokken.

Ved forudsigelse af tidshorisonten for, hvornår en effekt af ændringen af arealanvendelsen er synlig

i Drastrup, skal det holdes for øje, at mass transfer koefficienten er bestemt for en kalkblok på 60 cm og forsøgsperioder af 3 uger. Ved modelleringen af stoftransporten i Drastrup har nitratforureningen foregået over mange år, hvorved hele matricen er taget i brug i det øvre kalklag. Ydermere vil der i Drastrup findes sprækker, der er større end dem, der findes i kalkblokken. En bestemmelse af mass transfer koefficienten vil derfor afhænge af, hvilke niveauer af sprækkesystemet som er aktivt i Drastrup. Herved kan mass transfer koefficienten kun bestemmes ved at skue på denne, indtil forsinkelsen af nitrat stemmer overens med målte værdier i indvindings- og moniteringsboringer.

6.7 Sammenfatning

Ud fra forsøgene på hhv. lille, mellem og stor skala samt anden litteratur kan det konkluderes, at skalaen har en stor indflydelse på de bestemte parametre. Det er derfor vigtigt, at der ved inddragelse af forsøgsdata fra mindre skala tages højde for, at der kan forekomme en ændring i de bestemte parametre, hvis disse skal benyttes til at forudsige strømninger og stoftransport på større skala. Ved modellering af stoftransporten i Drastrup benyttes denne viden samt forståelse af systemet til at give en vurdering af nitratpåvirkningen i området.

Effekt af ændret arealanvendelse

For at besvare projektets hypotese har følgende kapitel til formål at undersøge, hvornår omlægningen af arealanvendelsen er synlig i de målte nitratkoncentrationer, samt hvornår de målte nitratkoncentrationer er under grundvandskriteriet. Dette gøres på baggrund af en tredimensional numerisk MODFLOW model opstillet i GMS af NIRAS A/S. Flowmodellen rekalibreres efter den tilegnede viden, som blev fundet ved strømningsforsøget på stor skala. Der benyttes to metoder til at give en vurdering af tidshorisonten. Ved den første metode anvendes "particle tracking" i GMS til at bestemme en alder for det indvundne vand. Ud fra denne alder, og de beregnede retentionsfaktorer fra forsøget på mellem skala, gives en vurdering af, hvad tidshorisonten er. Ved den anden metode bygges en stoftransportmodel oven på den numerisk MODFLOW model ved anvendelse af den tilegnede viden fra strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala. Stoftransportmodellen kalibreres i forhold til observerede tider for gennembrud i Drastrup. Resultater fra modellering findes i bilag E.7.1, og modeller er vedlagt i bilag E.7.2.

7.1 Resumé af drikkevandsproblematikken i Drastrup

Ved introduktion til Drastrup kildeplads blev drikkevandsproblematikken fremhævet. I 1986 blev en nitratkoncentration på 120 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ målt i det øvre magasin, hvorfor en omlægning af arealanvendelsen blev igangsat for at reducere den tilførte mængde nitrat fra landbruget i indvindingsoplandet til Drastrup kildeplads. I 2001 var den gennemsnitlige udvaskede nitratkoncentration fra rodzonen mindsket til 46 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$, og effekten af arealomlægningen blev fundet markant i rodzonen, hvor nitratkoncentrationen måltes ned til 0 - 5 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Imidlertid forblev nitratkoncentrationen i grundvandet uændret, og i moniteringsboringer ved Drastrup kildeplads er nitratkoncentrationen fortsat over grundvandskriteriet.

Der blev således opstillet en hypotese om, at den manglende synlige effekt i grundvandet skyldes, at geologien i indvindingsoplandet primært består af opsprækket kalk. Ved strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala blev det fundet, at den hydrauliske ledningsevne er høj, og den effektive porøsitet er lille, hvilket resulterer i høje porevandshastigheder i det øvre kalklag i området. Årsagen til den manglende effekt må således skyldes en stor forsinkende effekt af kalkens dobbelte porøsitet, hvilket blev verificeret i stoftransportforsøget på mellem skala.

7.2 Modelopsætning og formål

Formålet med denne model er at blive i stand til at vurdere, hvornår omlægningen af arealanvendelsen er synlig i de målte nitratkoncentrationer, samt hvornår de målte nitratkoncentrationer er under grundvandskriteriet. Et specifik årstal opgives ikke, grundet det ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala blevet fundet, at de anvendte metoder til at beskrive stoftransporten i dobbelt porøse medier er mangelfulde.

Til at vurdere, hvornår en reduktion af nitratkoncentrationen starter samt, hvornår nitratkoncentra-

tionen er under grundvandskriteriet tages udgangspunkt i en tredimensional numerisk flowmodel opstillet af NIRAS A/S. Modellen blev opsat med formålet at vurdere effekten ved udvidelse af indvindingskapaciteten, hvorved modellen ikke er forsynet med et stoftransportmodul. For litteratur, der beskriver modelopbygningen, henvises til Jensen et al. (2004).

Oven på denne flowmodel laves beregninger af stoftransporten ved to metoder. Den første er en simpel model og den anden er mere avanceret stoftransportmodel, disse er beskrevet nedenfor. Begge modeller opbygges med den antagelse, at Drastrup området er blevet forurenet med en given nitratkoncentration, C_0 , i hele dybden og i begge faser. I dette tilfælde er det valgt at tage udgangspunkt i 1994, hvor den udvaskede nitratkoncentration var på 79 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Det antages således, at hele Drastrup området er blevet forurenet med en nitratkoncentration på 79 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Med denne startbetingelse ses der på, hvad tidshorisonten er for, at netto nedbøren fortynder nitratkoncentrationen til det halve. Årsagen til, at denne startbetingelse introduceres er, at hvis en model skulle opstilles til at simulere den situation, der findes i Drastrup i dag, og derudfra beregne, hvad tidshorisonten er for en synlig effekt, kræves bestemmelse af mængden af det udvaskede nitrat fra de forskellige arealanvendelser, landbrug, skov (forskellige aldre) og byen, samt præcisering af, hvornår ændringer i arealanvendelsen er foregået. Med udgangspunkt i denne modelopbygning foretages en vurdering af, hvad tidshorisonten er for, at startkoncentrationen halveres ved to metoder:

(a) Simpel model

Ved brug af "particle tracking" i GMS er det muligt at bestemme grundvandets alder, som indvindes ved de to kildepladser. Denne alder beskriver hvor lang tid der går, før vandet, som infiltrerer fra grundvandsspejlet, indvindes i boringerne, og derved hvor lang tid det tager at udskifte vandet i magasinet. I den tid vandet transporteres fra grundvandsspejlet til indvindingsboringerne kan nitraten blive forsinket ved diffusion ind i matricen. Ud fra de beregnede retentionsfaktorer ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala, er det således muligt at give et bud på, hvad det vil tage at halvere koncentrationen, hvis det antages, at Drastrup området er blevet forurenet med en koncentration, C_0 .

(b) Stoftransportmodel

Ved at bygge en stoftransportmodel oven på flowmodellen er det muligt at beskrive transporten af nitrat i Drastrup. Modellen opbygges på baggrund af parametrene bestemt i kapitel 6.

Der opbygges to stoftransportmodeller, disse er listet nedenfor:

- **Stoftransportmodel 1**: 3D numerisk model i GMS uden tilbageholdelse. Modellen uden tilbageholdelse benyttes som platform til at undersøge hvilken effekt tilbageholdelsen har ved stoftransportmodel 2.
- **Stoftransportmodel 2**: 3D numerisk model i GMS med sorption. Modellen benyttes til at beskrive stoftransporten og give et bud på, hvad tidshorisonten er for en halvering af startkoncentrationen.

Det er således valgt at anvende en beskrivelse af udvekslingen mellem sprækker og matrice ved en ækvivalent retentionsfaktor. Dette skyldes, at det ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala blev fundet, at denne model er den letteste at anvende i forhold til en kalibrering samt, at metoden gav acceptable resultater.

Ved anvendelse af GMS til at estimere tidshorisonten for en halvering af startkoncentrationen, skal det bemærkes, at modellen kun sættes op til at regne på strømninger og stoftransporten for den mættede zone. For at tage højde for transporten i den umættede zone skal der således estimeres, hvor lang tid det tager for vand og stof at blive transporteret fra terræn til grundvandsspejlet. Dette gøres på lignende vis som i kapitel 1 ved at regne på tiden ved ren advektion. Figur 7.1 illustrerer, hvorledes kapitlet opbygges.



Figur 7.1: Kapitlets opbygning.

I de følgende afsnit præsenteres den konceptuelle model, herunder modelafgrænsning og den geologiske model og derefter den numeriske models grid. Efterfølgende beskrives input til flowmodellen og kalibrering og validering af denne. På lignende vis præsenteres input til stoftransportmodellen samt en kalibrering og validering. Herefter præsenteres estimater på transporttider i den umættede zone. Slutteligt præsenteres modellernes resultater og disse diskuteres i forhold til deres anvendelighed til at estimere en tidshorisont på en effekt af arealanvendelsen i Drastrup.

7.3 Konceptuel model

På figur 7.2 ses den konceptuelle model, som beskriver de forsimplinger, der er lavet for at modellere strømninger og stoftransport af nitrat i Drastrup.



Figur 7.2: Konceptuel model anvendt til at beskrive strømninger og stoftransporten af nitrat i Drastrup. Det bemærkes, at begrebet "ækvivalent retention"er anvendt, når stoftilbageholdelse i ler- eller kalk-matrice modelsimuleres vha. en adsorptionsisoterm.

I de følgende afsnit beskrives, hvorledes flow- og stoftransportmodellen er afgrænset, og hvorledes den geologiske model er opstillet.

7.3.1 Model afgrænsning

Modelområdet er illustreret på figur 7.3. Modellen er afgrænset mod nord af Limfjorden (Direchlet randbetingelse), mod øst af Østerå (Neumann randbetingelse) og mod vest ved at gå på tværs af potentialelinjerne (Neumann randbetingelse).



Figur 7.3: TV: Modelområde for numerisk grundvandsmodel opstillet af NIRAS A/S med grundvandspotentiale. (Jensen et al., 2004, Redigeret)
 TH: Modelområde for numerisk grundvandsmodel opstillet af NIRAS A/S med vandløb. (Jensen et al., 2004, Redigeret)

7.3.2 Geologisk model

Den geologiske model opsat af NIRAS A/S er opbygget af seks lag, som består af hhv. sand, ler og kalk, se figur 7.4. Kalklaget er blevet delt op i et øvre og nedre lag, da kalkens hydrogeologiske egenskaber varierer i dybden, med størst hydraulisk ledningsevne i den øvre del, hvor grundvandsindvindingen ligeledes forekommer.



Figur 7.4: Lagdelingen i Drastrup.

For at verificere, hvorledes den geologiske model passer i Drastrup området, er der lavet tre tværsnitsprofiler i området, disse fremgår af figur 7.5.



Figur 7.5: Tværsnitsprofilers placering i Drastrup området. Bemærk de særligt fremhævede boringer. (GEUS, 2011)

Tværsnitsprofil 1, boringerne 34. 1741 og 34. 1744

På figur 7.6 ses tværsnitsprofil 1 ud fra boreprofiler fra GEUS.



Figur 7.6: Tværsnitsprofil 1 ud fra GEUS' boreprofiler. (GEUS, 2011)

På figur 7.7 ses den geologiske models tværsnit 1.



Figur 7.7: Tværsnitsprofil 1 for den geologiske model.

Ved sammenligning af tværsnitsprofilet fra GEUS' boreprofiler med modellen ses det, at kalklaget i modellen for boring 34. 1741 først starter i kote 1,1 m, hvor det ifølge boreprofilet starter i ca. kote 9 m. I den geologiske model ligger der i stedet for ler op til kote 8,8 m. Da ler har lignende egenskaber som kalk, vil det således ikke have en stor betydning i dette tilfælde. Ved sammenligning af GEUS' boreprofil for boring 34. 1744 med modellen ses det, at det øvre kalklags placering er for dybt, dog ligger der i følge GEUS' tværsnitsprofil en sandlinse til venstre for boring 34. 1744, hvorved det kunne ligne, at denne linse er blevet forskubbet lidt i modellen. Ses der på geologien i modellen, figur 7.7, mellem boring 34. 1741 og 34. 1744 samt til højre for boring 34. 1744 ses det dog, at der findes et for tykt lag sand og ler sammenlignet med GEUS' tværsnitsprofil, figur 7.6.

Tværsnitsprofil 2, boringerne 34. 514 og 34. 511

På figur 7.8 ses GEUS' tværsnitsprofil 2.



Figur 7.8: Tværsnitsprofil 2 ud fra GEUS' boreprofiler. (GEUS, 2011)

På figur 7.9 ses modellens tværsnitsprofil 2.



Figur 7.9: Tværsnitsprofil 2 for den geologiske model.

Ved sammenligning af tværsnitprofil 2 fra GEUS og den geologiske model ses det, at kalken fra boring 34. 514 til 34. 511 ligger ca. 10 - 15 m for dybt i den geologiske model sammenlignet med GEUS' tværsnitprofil. I stedet for kalk ligger der således sand og ler i den geologiske model.

Tværsnitsprofil 3, boringen 34. 1745

På figur 7.10 og 7.11 ses hhv. tværsnitsprofil 3 fra GEUS og den geologiske model.



Figur 7.10: Tværsnitsprofil 3 ud fra GEUS' boreprofiler. (GEUS, 2011)



Figur 7.11: Tværsnitsprofil 3 for den geologiske model.

Ved sammenligning af de to tværsnitsprofiler ses det, at den geologiske model stemmer overens med GEUS' boreprofil for boring 34. 1745 og ligeledes for geologien længst til højre på tværsnitsprofilet. Ved boring 34. 511 ligger kalken i den geologiske model for dybt, som omtalt for tværsnitsprofil 2.

Det kan således konkluderes, at den geologiske model har nogle svage punkter, og at et af disse findes ved Drastrup kildeplads 1, hvor kalklaget er placeret ca. 10m for dybt. Dette vil resultere i, at modellen vil beregne en for kort tidshorisont for, hvornår en ændring af arealanvendelsen vil have en effekt på kvaliteten af det indvundne vand i Drastrup i nogle områder, da sand og kalk har forskellige vand- og stoftransport egenskaber.

7.4 Numerisk model

NIRAS A/S' model har som tidligere nævnt været udført til at beskrive vandstandene i området, hvorfor hvert enkelt lag udelukkende har været repræsenteret med en celle i dybden. Ved modellering af stoftransporten kan dette blive et problem, da enkelte lag herved kan have en tykkelse på op til 70 m. I sådanne områder vil den numeriske dispersion være stor. Stoftransporten foregår dog primært i lag 5, som er defineret til at have en tykkelse på ca. 30 m. Optimalt set havde modellen været opdelt i flere lag, eksempelvis en opdeling pr. halve meter, men grundet simuleringstiden er dette ikke gjort. Ved mindre celler øges simuleringstiden betydeligt, hvilket ikke er ønskværdigt grundet projektets tidsaspekt.

I det horisontale plan er modellen opdelt i celler af størrelsen på ca. 20 x 20 m i området ved Drastrup kildepladser og i ydreområderne haves celler med størrelser op til 200 x 200 m. Den numeriske models grid i det horisontale plan ses illustreret på figur 7.12.



Figur 7.12: Det numeriske grid for den numerisk model i det horisontale plan.

7.5 Hydrogeologiske processer

I dette afsnit præsenteres de anvendte hydrogeologiske parametre som der tages udgangspunkt i til en kalibrering. Efterfølgende kalibreres flowmodellen og resultatet valideres ud fra grundvandspotentialet.

Netto nedbør

Netto nedbøren i Drastrup området kan bestemmes ud fra vandbalanceligningen, se ligning (7.1).

$$N = P - F - T_R = A_S + I + \Delta M_a \tag{7.1}$$

I modellen opsat af NIRAS A/S er det valgt at sættes netto nedbøren til 346 $\frac{mm}{ar}$, hvilket vurderes at være rimeligt og derfor anvendes i denne model.

Hydraulisk ledningsevne

Til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne i området benyttes NIRAS A/S' værdier for sand og ler lagene, disse ses på figur 7.13 til 7.14. Det bemærkes, at der i det øvre sandlag findes en linse af tørv, og i lerlaget findes linser af sand.



Figur 7.13: TV: Den hydrauliske ledningsevne tildelt i det øvre sandlag (lag 1) samt for en tørvelinse. TH: Den hydrauliske ledningsevne tildelt for det øvre lerlag (lag 2) samt for sandlinser.



Figur 7.14: TV: Den hydrauliske ledningsevne tildelt for det nedre sandlag (lag 3). TH: Den hydrauliske ledningsevne tildelt for det nedre lerlag (lag 4) samt for sandlinser.

Som udgangspunkt for den hydrauliske ledningsevne i kalklagene inddrages resultaterne fra strømningsforsøget på mellem og stor skala. Ved forsøget på stor skala blev der bestemt, at den hydrauliske ledningsevne var $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Det blev fra strømningsforsøget på mellem skala bestemt, at den hydrauliske ledningsevne var $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Ved en rekalibreringen tages der således udgangspunkt i, at kalkens ledningsevne i lag 5, hvor grundvandet indvindes, som udgangspunkt er $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, men kan variere ned til $2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Da kalklaget kun er opdelt i to lag og det forventes, at den hydrauliske ledningsevne er aftagende med dybden, se figur 7.15, vil de rekalibrerede ledningsevner afspejle en middelværdi for de to kalklag. Dette understøttes af Price et al. (1993). Herved vil den hydrauliske ledningsevne være høj i det øvre kalklag og lav i det nedre kalklag.



Figur 7.15: Skitse over den aftagende hydrauliske ledningsevne med dybden (m.u. kalkens top).

Grundet den aftagende hydrauliske ledningsevne med kalkens dybde, vurderes det, at den hydrauliske ledningsevne i det nederste lag udelukkende er bestående af en kompakt kalk med en lav ledningsevne. På denne baggrund er det valgt at sætte den hydrauliske ledningsevne til $1 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, se figur 7.16 (th). Det er således udelukkende lag 5, som kalibreres for at få strømninger til at passe. Laget er opdelt i 5 zoner bestemt af NIRAS A/S, se figur 7.16 (tv). Det bemærkes, at modellen er opsat med en anisotropi for kalklagene på 1, hvilket er lavere end den bestemte værdi i kapitel 6 på en faktor 10. Årsagen til denne forskel skyldes en opsætningsfejl, det vurderes dog, at denne fejl vil være af mindre betydning for en endelige bestemmelse af tidshorisonten.



 Figur 7.16: TV: Den hydrauliske ledningsevne tildelt som udgangspunkt til en rekalibrering af modellen for det øvre kalklag (lag 5).
 TH: Den hydrauliske ledningsevne tildelt i modellen for det nedre kalklag (lag 6).

Indvindingsmængder

Som tidligere nævnt er grundvandsmodellen udført af NIRAS A/S med modeldata fra år 2003. Indvindingsmængderne fra vandværket er således forældede. Da det forventes, at stoftransportmodellen skal køres over mange årtier, hvor det formodes, at der løbende vil forekomme ændringer i grundvandspotentialet, grundet ændringer i indvindingsmængder, vurderes det derfor, at modeldataene fra år 2003 repræsenterer den fremtidige situation acceptabelt.

Kalibrering og validering af flowmodel

Ved rekalibreringen af MODFLOW modellen, er det som tidligere omtalt udelukkende de hydrauliske ledningsevner i lag 5 som kalibreres, for at få grundvandspotentialet til at passe. De kalibrerede hydrauliske ledningsevner er illustreret på figur 7.17. Det ses, at de kalibrerede værdier alle ligger indenfor for det estimerede interval $2,6 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Figur 7.17: Hydrauliske ledningsevner for lag 5 fundet ved kalibrering af trykhøjder til pejledata.

Ved brug af de kalibrede hydrauliske ledningsevner findes et acceptabelt fit af modellens trykhøjder til målte trykhøjder i boringer samtidig med, at gradienten nær Drastrup kildeplads 1 findes acceptabel. Det modellerede tryk er vist på figur 7.18.



Figur 7.18: Trykhøjden bestemt ved kalibrering af hydrauliske ledningsevner. Målestokkene indikerer afvigelsen fra pejledata. Pejledataene er rangeret i forhold til standardafvigelsen ved flere pejlinger udført over en årrække, nærmere beskrevet i Jensen et al. (2004).

7.6 Stoftransport processer

Der opstilles to stoftransportmodeller til at vurdere tidshorisonter for, hvornår arealomlægningen forventes at have en synlig effekt på de målte nitratkoncentrationer samt, hvornår nitratkoncentrationen er under grundvandskriteriet. Dette gøres ved at tilføje stoftransportmodulet (MT3DMS) i GMS. I dette afsnit beskrives først, hvorledes stammen til de to stoftransportmodeller opbygges og efterfølgende beskrives, hvorledes stoftransportmodel 2 beskriver tilbageholdelsen forårsaget af udvekslingen mellem sprækker og matrice samt værdisættelse af parametre. Denne model kalibreres ved at sammenligne modellerede og målte gennembrudstider i forhold til mængden af overliggende kalk og ler i den mættede zone.

- Basic Transport Package

Pakken er automatisk tilkoblet, når MT3DMS modulet benyttes. Det defineres, at modellen skal simulere 80 år startende fra år 1994. Det vides, at den udvaskede nitratkoncentrationen fra rodzonen var 79 $\frac{mg}{L}$. Det vælges derfor at prædefinere en koncentration i alle modellens

celler på 79 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Dette gælder således både sand-, ler- og kalklagene.

I tabel 7.1 findes værdier for anvendte effektive porøsiteter. Den effektive porøsitet defineres i sandlagene til $0.3 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$, denne er valgt på baggrund af tabel 1.2 på side 26. Den effektive

porøsitet for lerlagene samt det øverste kalklag defineres til $0.014 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$ bestemt fra strømningsforsøget på stor skala. Det antages således, at leren har samme stoftransportegenskaber som det øvre kalklag. Den effektive porøsitet for det dybere kalklag forventes mindre grundet en mere kompakt kalk, og sættes derfor til $0.010 \frac{\text{cm}^3 \text{porer}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$. Disse effektive porøsiteter anvendes ligeledes ved beregning af grundvandets alder i den simple model.

- Advection Package
- Pakken benyttes, da der forekommer en advektiv transport.
- Dispersion Package

Ved modellering af strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala blev det fundet, at en dispersion på 0,15 m var nødvendig. Da modellen over hele Drastrup er opbygget af celler med størrelse op imod 200 x 200 m vil den numeriske dispersion være større, hvorfor det vælges ikke at tilføje yderligere dispersion i form af mekanisk dispersion.

- Source/Sink Mixing Package
- Pakken er inkluderet, da denne er påkrævet for at tage højde for indvindingen i området.
- Chemical Reaction Package

Denne pakke er udelukkende benyttet i stoftransportmodel 2. Det vælges at negligere biologisk og kemisk nedbrydning af nitrat. Nedbrydningen af nitrat sker ved iltfrie forhold, og der er fra boringer i hele indvindingsområdet konstateret et oxygen indhold over $0.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ jf. GEUS, som er kravet for, hvornår nedbrydning af nitrat vil forekomme ifølge Feast et al. (1998). Der vil formegentligt forekomme en nedbrydning lige ved overgangen imellem sprækker og matrice, hvor der løbende tilføres organisk materiale fra sprækkerne, og der formegentligt forekommer iltfrie forhold i matricen. Nedbrydningen vil alt andet lige foregå langsomt i kalken. Grundet den lange simuleringsperiode på 80 år forventes det, at nedbrydningen vil have betydning, men da det er usikkert, hvor stor denne præcist er, vælges det at sætte den til nul. Nitratkoncentrationen skal således fortyndes ud af modellen. Beregningen bliver herved på den sikre siden.

Nedenfor præsenteres, hvorledes hver model opsættes til at beskrive udvekslingen mellem sprækker og matrice.

Stoftransportmodel 1: Ingen tilbageholdelse

Modellen opstilles udelukkende med de tidligere beskrevne pakker, med undtagelse af 'Chemical Reaction Package', da modellen ikke medtager tilbageholdelse af nitrat ved udveksling mellem sprækker og matrice. Modellen benyttes til at eftervise, hvilken effekt tilbageholdelsen har i model 2.

Stoftransportmodel 2: Sorption

Modellen opstilles med tidligere beskrevne pakker. Ydermere tilføjes 'Chemical Reaction Package' med en lineær adsorptionsisoterm. Denne model beskriver hermed udvekslingen mellem sprækker og matrice med en ækvivalent retentionsfaktor. Som udgangspunkt for distributionskoefficient benyttes de beregnede værdier fra strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala for både kalk og ler, da det antages, at leren har samme egenskaber som kalk. De tildelte retentionsfaktorer for hvert lag ses i tabel 7.1. Det bemærkes, at da modellen ikke kan regne med en distributionskoefficient på nul for sandlagene, er disse ligeledes tildelt en distributionskoefficient, denne er dog meget lav, da der ikke forekommer en immobil fase. Ydermere tildeles densiteter for lagene, da denne skal benyttes til at beregne retentionen. For sandlagene anses dennes størrelse som værende uden betydning da distributionskoefficienten er lav. For kalk- og lerlagene sættes densiteten til den beregnede værdi ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala.

	θ_{eff}	K_d	ρ_b	R
	$\left[\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}\right]$	$\left[\frac{m^3}{kg}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	[-]
Lag 1: Sand	0,300	$1,00 \cdot 10^{-10}$	1958	≈ 1
Lag 2: Ler	0,014	$1,\!48\cdot10^{-4}$	1958	22
Lag 3: Sand	0,300	$1,\!00\cdot 10^{-10}$	1958	≈ 1
Lag 4: Ler	0,014	$1,\!48\cdot10^{-4}$	1958	22
Lag 5: Kalk	0,014	$1,\!48\cdot10^{-4}$	1958	22
Lag 6: Kalk	0,010	$1,\!48\cdot10^{-4}$	1958	22

Tabel 7.1: Tildelte distributionskoefficienter og densiteter i modellen.

Kalibrering og validering af stoftransportmodel 2

Stoftransportmodel 2 kalibreres ved at skue på retentionsfaktoren for ler- og kalklagene således, at starten på gennembruddet i modellen fitter til de målte i Drastrup. Der tages udgangspunkt i de målte gennembrudskurver i Drastrup og det årlige kvælstofoverskud, som blev præsenteret i kapitel 1.

På figur 1.6 på side 21 ses det, at det årlige kvælstofoverskud på landsplan har været faldende siden år 1994. På figur 7.19 ses effekten fra det faldende kvælstofoverskud først er synlig efter ca. 14 år, 0 - 8 m under grundvandsspejlet. Det svarer til, at for områder, hvor transporten af nitrat skal foregå igennem ca. 12 m kalk og ler, skal der gå ca. 14 år før en ændring ses. Dette svarer til, at der forekommer en tilbageholdelse af nitraten på ca. 1 år pr. meter kalk. For 12 - 15 m under gvs ses effekten endnu ikke, men det formodes, at denne vil træde i kraft i et af de kommende år. Det vurderes i dette tilfælde, at kurven vil begynde at aftage i år 2012. Der går således 5 år fra der ses en ændring i det øverste filter til, der ses en ændring i det andet øverste filter. Afstand mellem det øverste filtres bund og den andet øverste filters top er 4 m, og afstand mellem de to filters midte er 9,5 m. Herved haves en tilbageholdelse af nitrat på 0,5 - 1,25 år pr. meter kalk. Ud fra disse beregninger vurderes det således, at tilbageholdelsen af nitrat skal være ca. 1 år pr. meter kalk. For at kalibrere modellen udvælges tre moniteringsboringer, boring 34. 1744, 34. 514 og 34. 1745, hvor det ønsker af fitte starten på modellerede gennembrudskurver med de målte i Drastrup. Geologien for disse boringer blev tidligere beskrevet i afsnit 7.3. I tabel 7.2 ses der, hvor meget kalk og ler samt sand, der findes i den mættede zone. Det skal bemærkes, at det antages, at gennembrudskurven for boringerne måles midt i cellen i lag 5 og derved midt i det øvre kalklag.

Boring	Kalk og ler	Sand	Beregnet tid til start på gennembru		
	[m]	[m]	[antal år efter 1994]	[år]	
34. 1744	6,9	10,5	7	2001	
34. 514	19,6	4,1	20	2014	
34. 1745	13,0	0,0	13	2007	

Tabel 7.2: Beregnet forsinkelse på start på gennembrud ud fra mængden af kalk og ler i den mættede zone over målepunkt.

På figur 7.20 til 7.22 ses modellerede gennembrudskurver ved forskellige *R*-værdier for de tre udvalgte moniteringsboringer, boring 34. 1744, 34. 514 og 34. 1745, målte i midten af det øvre kalklag.



Figur 7.19: Målt nitratkoncentration i boring 34. 1743 og 34. 1744 ved forskellige filterdybder.

Gennembrudskurver for boring 34. 1744

På figur 7.20 ses det, at koncentrationen i boring 34. 1744 falder momentant fra 79 $\frac{mg}{L}$ for alle de modellerede gennembrudskurver, først når koncentrationen når ca. 60 $\frac{mg}{L}$ sker der en tilbageholdelse ved stoftransportmodel 2 med forskellige *R*-værdier. Årsagen til dette fald på trods af, at der findes sorption, kan skyldes, at der ved denne boring findes et overliggende sandlag, og at der i sandet forekommer et hurtigt fald i koncentrationen, som vil resulterer i et fald i koncentration fra gennembrudet start i det øvre kalklag. Det vurderes herudfra, at det ikke er muligt at bruge denne boring til at kalibrere modellen efter.



Figur 7.20: Gennembrudskurver ved boring 34. 1744 i midten af det øvre kalklag.

Gennembrudskurver for boring 34. 514

På figur 7.21 ses målte gennembrudskurver ved boring 34. 514 i det øvre kalklag. Det ses ligeledes for disse gennembrudskurver, at der forekommer et mindre fald i starten er gennembrudskurverne. Det vurderes i dette tilfælde at være tilstrækkelig lille og derfor findes gennembrudskurverne brugbare til at kalibrere modellen efter.



Figur 7.21: Gennembrudskurver ved boring 34. 514 i midten af det øvre kalklag.

Gennembrudskurver for boring 34. 1745

På figur 7.22 ses målte gennembrudskurver ved boring 34. 1745 i det øvre kalklag. Det ses, at ligesom for de to tidligere boringer forekommer de små variationer i koncentrationen i starten af gennembruddene. Det vurderes ligeledes i dette tilfælde, at dataene er brugbare til kalibrering.



Figur 7.22: Gennembrudskurver ved boring 34. 1745 i midten af det øvre kalklag.

Bestemmelse af gennembrudstider

I tabel 7.3 ses beregnede og vurderede tider ud fra modellede kurver for, hvornår et gennembrud starter. Gennembrudstider ved boring 34. 1744 negligeres, som tidligere beskrevet. Det ses, at den beregnede tid for boring 34. 514 på 20 år ikke opnås ved nogen af de valgte værdier for *R*. Hvorimod den beregnede tid for boring 34. 1745 på 13 år opnås ved R = 66 svarende til $K_d = 4,65 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$. Årsagen til denne forskel kan skyldes, at boring 34. 514 ligger tæt på Drastrup kildeplads 1, hvorved indvinding fortynder koncentrationen målt i boring 34. 514. Ydermere ligger boring 34. 1744 og boring 34. 1745 blot 330 m fra hinanden, og det findes derfor rimeligt at anvendes målte værdier ved boring 34. 1744 til at fitte modellen ved boring 34. 1745 efter.

Tabel 7.3: Beregnede og modellerede starttider for gennembrud i modellens øvre kalklag. Den beregnede tid til starten på gennembruddene er bestemt ud fra mængden af kalk og ler, som ligger over målepunktet i den mættede zone, og tilbageholdelsen på 1 år pr. meter kalk eller ler.

Tid til start på gennembrud [år]							
	for modeller med forskellige R-værdier						
Boring	Beregnet	Beregnet 22 66 88 110 132					
34. 514	20	3	8,5	11,5	14	17	
34. 1745	13	7	13	20	26	>26	

Det vurderes således, at modellen fitter til observerede starttider for gennembrud ved R = 66 svarende til $K_d = 4,65 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$. Sammenholdes dette med strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala ses det, at retentionsfaktoren er større. Dette forventes også, da retentionsfaktoren er stigende med skala.

7.7 Stoftransport i den umættede zone

Grundet, at GMS ikke medregner transporten af stof i den umættede zone, vælges det at give et estimat af transporttiden i den umættede zone. Transporten i den umættede zone afhænger af lagtykkelserne, hvorfor figur 7.23 til 7.25 illusterer den summerede lagtykkelse for hhv. sand, ler og kalk, som findes i GMS modellen erhvervet fra NIRAS A/S. Til omregning af koter til lagtykkelser interpoleres dataene til raster vha. kriging interpolation, og et interpoleret raster kort af grundvandspotentialet fra år 2005 fratrækkes.

Det ses på figur 7.23, at mængden af sand i den umættede zone ved indvindingsområdet ligger i intervallet 1 - 15 m. Sammenholdes dette med tidligere teori om, at overliggende sandlag tykkere end 3 m ville virke som et forsinkelsesbassin, vil transporten af stof i kalk i den umættede zone ske med matricens ledningsevne. De store tykkelser af sand ses i landskabet som morænebakker.



Figur 7.23: Den summerede tykkelse af sand over grundvandsspejlet.

Det ses på figur 7.24, at leren er svagt til næsten ikke forekommende omkring Drastrup kildeplads 1 (boring 34. 514). Lerlaget har en ca. tykkelse på 0 til 1 m i den umættede zone nær kildepladsen.



Figur 7.24: Den summerede tykkelse af ler over grundvandsspejlet.



Det ses på figur 7.25, at kalkens tykkelse i den umættede zone afgrænses ved Drastrup kildeplads 1. Det ses, at der i den umættede zone er en kalklagstykkelse på 0 til 1 m nær kildepladsen.

Figur 7.25: Den summerede tykkelse af kalk over grundvandsspejlet.

Det ses desuden, at der på figurerne hverken forekommer sand, ler eller kalk nord for Drastrup kildepladserne. Grundvandspotentialet ligger i dette område så højt, at der flere steder forekommer vand på terræn, hvilket forklarer den manglende umættede zone. For at kunne beskrive retentionen i den umættede zone illustreres nedenfor de geologiske profiler for boring 34. 514, 34. 1744 og 34. 1545. De geologiske profiler ses på figur 7.26.



Figur 7.26: Geologiske profiler af boring 34. 1744, 34. 514 og 34. 1545. Figuren er ikke målfast.

Tilbageholdelsen i den umættede zone er beregnet ud fra de teoretiske transporthastigheder beskrevet i afsnit 1.3. Det blev estimeret, at transporthastigheden i kalkmatricen og leren, er $0.75 \frac{\text{m}}{\text{år}}$, og i sand er $3.0 \frac{\text{m}}{\text{år}}$ ved ren advektion. Ved at benytte disse teoretiske hastigheder på lagtykkelserne i de præsenterede boringer, kan de summerede transporttider bestemmes, se tabel 7.4.

	Tykkelse	Transporttid
	[m.o.gvs]	[år]
Boring 34. 1744		
Sand	8,7	2,9
Ler	1,0	1,3
Kalk	0	-
	Sum:	4,2
Boring 34. 514		
Sand	3,7	1,2
Ler	0	-
Kalk	0	-
	Sum:	1,2
Boring 34. 1745		
Sand	10,1	3,4
Ler	1,5	2
Kalk	1,3	1,7
	Sum	7,1

Tabel 7.4: Bestemmelse af transporttid fra terræn til gvs. Transporttiderne bestemmes ud fra tidligere estimerede transporthastigheder, se afsnit 1.3.

Det ses således, at transporttiden i den umættede zone ved kildepladserne er i intervallet 1,2 - 7,1 år. Opstrøms for kildepladserne findes der dog en tykkere umættet zone, hvorfor det vælges at give et estimat på, hvad den gennemsnitlige transporttid er i den umættede zone. Det vurderes på baggrund af kriging interpolationerne, at den gennemsnitlige sandlagstykkelse er 15m, den gennemsnitlige lerlagstykkelse 5m, og den gennemsnitlige kalklagstykkelse er 1 m i den umættede zone. Herved kan en gennemsnitlig transporttid i områdets umættede zone bestemmes til ca. 13 år.

En mere præcis måde at have taget højde for transporttiden i den umættede zone, kunne have være foretaget ved at inddele modellens opland i zoner afhængig af transporttiden i den umættede zone og forsinket reduktionen af den tilførte nitratkoncentration på $0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Således, at der i nogle området ikke var sket en reduktion af den tilført mængde nitrat ved det første tidsskridt i 1994, men først f.eks. 10 år efter. Den foretagende forsimpling vurderes dog at være acceptabel, da transporten i den umættede zone på nogle kilometer, er kort. Den umættede zone har derfor en lille indflydelse på den samlede transporttid.

7.8 Resultater

I dette afsnit præsenteres resultater for den simple model og stoftransportmodellen.

7.8.1 (a) Simpel model

Ved hjælp af "particle tracking" i GMS, kan grundvandets alder bestemmes for det indvundne vand til ca. 2 år, se figur 7.27 og 7.28. Årsagen til den unge alder skyldes kombinationen af kalkens høje hydrauliske ledningsevne og lave effektive porøsitet.



Figur 7.27: Indvindingszone ved 6 måneder (tv) og 1 år (th).



Figur 7.28: Indvindingszone ved 1,5 år (tv) og 2 år (th).

Det skal bemærkes, at denne alder er den gennemsnitlige alder, da noget vand vil blive transporteret hurtigere og andet langsommere. Denne beregning tager således ikke hensyn til dispersion.

I løbet af disse 2 år vil partikler med forskellige banelængder blive transporteret til indvindingsboringerne. Det antages i denne forbindelse, at den gennemsnitlige banelængde er 2km. Det gøres på baggrund af at den længste partikelbane er ca. 4km.

Under denne vandtransport på 2 år ved en længde på 2 km vil nitraten blive tilbageholdt ved udveksling mellem sprækker og matrice. For at bestemme en gennemsnitlig opholdstid for nitraten skal der således bestemmes en retentionsfaktor. Ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala blev der fundet en retentionsfaktor for 50% gennembrud på ca. 10 for 0,60m kalk. Herudfra kan det konkluderes, at retentionsfaktoren mindst er 10 for tilbageholdelsen af nitraten i Drastrup, da transportafstanden er gennemsnitlig 2 km. Grundet vandets længere transportafstand i Drastrup (2000m) end ved forsøget på mellem skala (0,6m), kan det tænkes, at for hver 0,6m kalk af de 2000m vil nitraten blive tilbageholdt med en faktor 10. Ud fra denne betragtning kan det antages, at retentionsfaktoren skal opskaleres lineært med skalaen, herved kan retentionsfaktoren for skalaen 2 km bestemmes til $\frac{2000 \text{ m}}{0,6\text{ m}} \cdot 10 \approx 33\,000$. Ved at multiplicere grundvandets alder (ca. 2 år) med retentionsfaktorerne (10 og 33000) findes en gennemsnitlig transporttid på ca. 20 - 66000 år. Denne transporttid svarer til den tid, det vil tage at halvere koncentrationen i det indvundne vand, hvis nitratkoncentrationen i det udvaskede vand fra rodzonen går fra C_0 til 0 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ og grundvandsmagasinet indeholder koncentrationen C_0 .

GMS modellen tager dog ikke højde for stoftransporten i den umættede zone, hvorfor denne transporttid skal tillægges. I afsnit 7.7 blev den gennemsnitlige transporttid i den umættede zone bestemt til 13 år. Transporttiderne bestemt ovenfor adderes derfor med transporttiderne i den umættede zone, og den gennemsnitlige tid for en 50% reduktion vil således ligge i intervallet ca. 33 - 66000 år.

Der findes således et meget bredt spænd for, hvad tidshorisonten kan være for at halvere startkoncentrationen i det indvundne vand. Det vurderes dog, at grundet den bestemte retentionsfaktors skala på 0,6 m, er denne retentionsfaktor bestemt for små og mellem sprækkestørrelser. I Drastrup området, hvor skalaen er 2 km, vil de store sprækker ydermere være aktive. I disse store sprækker vil hastigheden være høj, hvorved det er muligt, at de mindre sprækkesystemer ikke får samme indflydelse, som de har haft ved forsøget på mellem skala. Det vurderes således, at tiden for en halvering af koncentrationen på 66000 år er for høj. Modsat vurderes det ligeledes, at en tiden for en halvering af startkoncentrationen på 33 år er for lav, da der nu 10 år efter den ændrede arealanvendelse i flere boringer ikke ses nogle ændringer. Der vurderes således, at tiden for en halvering af startkoncentrationen må ligge et sted herimellem.

7.8.2 (b) Stoftransportmodel

For bedre at kunne præcisere tidshorisonten opstilles en mere avanceret model, en stoftransportmodel.

På figur 7.29 ses gennembrudskurver for modellen både med og uden tilbageholdelse for de tre udvalgte moniteringsboringer, boring 34. 1744, 34. 514 og 34. 1745, i modellens øvre kalklag. Det skal bemærkes, at det antages, at gennembrudskurven er målte midt i cellen og derved midt i det øvre kalklag.



Figur 7.29: Gennembrudskurver for modellen med og uden tilbageholdelse for boring 34. 1744, 34. 514 og 34. 1745 målt i modellens øvre kalklag.

Det ses på figuren, at gennembrudskurverne uden tilbageholdelse for de tre boringer er ens. Dette må skyldes, at geologien i oplandet for boringerne er ens. I tabel 7.5 ses det, at tiden for 50% gennembrud for modellen uden tilbageholdelse er ca. 2 - 4år. Dette stemmer godt overens med, at der blev fundet en gennemsnitlig grundvandsalder på 2år i den simple model.

Ved sammenligning af gennembrudskurverne med tilbageholdelse ses det, at kurverne starter forskelligt. Først falder gennembrudskurven for boring 34. 1744, som er den boring, hvor der ligger mest sand over målepunktet i den mættede zone. Dernæst gennembrudskurven for boring 34. 514, hvor der ligger næst mest sand og til sidst gennembrudskurven for boring 34. 1745, hvor der ikke ligger sand over målepunktet i den mættede zone. Ses der derimod på, hvor meget kurverne er faldet efter en tidsperiode på ca. 50 år (år 2043) ses det, at reduktion af koncentrationen er rimelig ens for alle gennembrudskurver. Det kan derfor konkluderes, at det afgørende for gennembrudskurvernes forløb på sigt ikke er den overliggende geologi, men geologien for boringens indvindingsopland. I løbet af de 80 år som modellen køres, ses det, at ingen af gennembrudskurverne for boringerne når 50% gennembruddet. For at bestemme tiden for 50% gennembruddet laves der derfor en ekstrapolation af kurvernes sluttelige hældninger. Herved kan tiden for 50% gennembrud regnes til de angivne værdier i tabel 7.5. Det ses, at for de udvalgte boringer tager det mellem 90 - 169 år at halvere koncentrationen. Dette svarer til en retentionsfaktor i intervallet 36 - 48. Det kan herudfra bestemmes at denne reelle retention er lavere end den indsatte retentionsfaktor i modellen på 66. Årsagen til denne forskel må skyldes modellens numeriske dispersion, som påvirker at en større retentionsfaktor er nødvendig for at opretholde en given tilbageholde. Denne modelfejl blev ligeledes fundet i forbindelse med modelleringen af forsøget på mellem skala.

For at tage højde for transporten i den umættede zone lægges der 13 år til den bestemte tidshorisont for en halvering af koncentrationen. Herved haves, at det tager 103 - 182 år for en halvering af koncentrationen i boringerne. Sammenlignes dette interval med tiden for 50% gennembrud med tiden fundet ved den simple model på 33 - 66000 år ses det, at tiden bestemt med stoftransportmodel 2 ligger i den lave ende at intervallet fra den simple model. Årsagen til, at en lineær opskalering af retentionsfaktoren for nitrat ikke forekommer, kan skyldes, at der findes høje hastigheder i de store sprækker, hvorved muligheden for diffusion ind i matricen mindskes, samt at transporten ud til det mindste sprækkesystem ikke kan finde sted i så høj en grad som ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala.

Tabel 7.5: Modellerede tider for 50% gennembrud og beregnede retentionsfaktorer for model 2.Retentionsfaktorerne er bestemt ved at dividere tid for 50% gennembrud for model 2 med
model 1's.

Boring	Kalk og ler	Sand	T _{50%}	Retentionsfaktor	
	[m]	[m]	Uden tilbageholdelse	Med tilbageholdelse	[-]
34. 1744	6,9	10,5	2,5	90	36
34. 514	19,6	4,1	3,5	169	48
34. 1745	13,0	0,0	3,0	121	40

Det kan herudfra konkluderes, at tidshorisonten er i omegnen af 100 - 200 år for en halvering af koncentration, hvis Drastrup området i hele dybden er blevet forurenet med en startkoncentration, C_0 , og tilførselen af nitrat går fra C_0 til nul ved første tidsskridt.

7.9 Diskussion

I dette afsnit diskuteres bestemte retentionsfaktorer og resultater for den simple og avancerede model i forhold til modelleringen af strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala, samt hvorledes disse resultater kan anvendes i forhold til en bestemmelse af en tidshorisont for, at nitratkoncentrationen i Drastrup kommer under den tilladte grænseværdi.

Retentionsfaktor og opholdstid

I tabel 7.6 ses bestemte retentionsfaktorer og opholdstider ved hhv. strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala, simpel model og avanceret model.

	Skala	Retentionsfaktor	Opholdstid	Pastammalsasmatada
	[m]	[-]	[år]	Bestemmersesmetode
Mellem skala	0,60	6 - 11	$5,5 \cdot 10^{-3} - 11,0 \cdot 10^{-3}$	Forsøg på mellem skala
	2000			Retentionsfaktor på mellem
Simpel model*		10 - 33 000	20 - 66 000	skala og lineær opskalering
				af denne retentionsfaktor
Avanceret model*	2000	36 48	00 170	Kalibreret stoftransportmodel
	2000	50 - 40	90 - 170	på stor skala

Tabel 7.6	Reelle ret	entionsfaktorer	bestemt på	forskellig	g skala.	*Retentions	faktorerne	dækker i	kun
	over trans	sporten i den mo	ettede zone,	da GMS	ikke me	dregner den	umættede	zone.	

Ud fra forsøget på mellem skala og udførte modelleringer på både mellem og stor skala er det fundet, at der er to ting som spiller ind, når retentionsfaktorer og opholdstider skal bestemmes for nitrat i kalk. Det første er skalaen, hvorved en opholdstid for nitraten bestemmes. Det andet er, at når en given retentionsfaktor anvendes ved numerisk modellering kan den reelle retentionsfaktor ikke anvendes direkte i modellen grundet modelfejl.

Ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala findes en retentionsfaktor til ca. 10 for en skala på 0,6m. Denne tilbageholdelse gælder for et sprækkesystem bestående af små og mellem sprækkestørrelser. Ved den avancerede model af Drastrup vil der udover disse sprækker også findes store sprækker. Hastigheden i de forskellige størrelser af sprækker vil være forskellige. Jo større sprækker desto større hastighed er det muligt at opnå. Herved vil der findes en større opholdstid i de mindre sprækker end i de store sprækker, hvilket vil medføre, at diffusionen mellem sprækker og matrice har længere tid til at forekomme på mellem skala end på felt skala. Dette resulterer i en mindre tilbageholdelse af nitraten ved store sprækker. Dette er ligeledes årsagen til, at bestemmelsen af retentionsfaktoren for det øvre interval ved den simple model overestimeres, da retentionsfaktoren ikke er direkte proportional med skalaen.

Ved implementering af bestemte retentionsfaktorer i forbindelse med numerisk modellering, er det fundet nødvendigt at korrigere den reelle retentionsfaktor i forhold til modellens gridstørrelse. Ved modellering på felt skala, avanceret model, er det fundet at for at opnå en reelle tilbageholdelse på en faktor 36-48, er det nødvendig at indsætte en retentionsfaktor på 66.

Anvendelse af resultater i forhold til en tidshorisont for en reduktion at nitratkoncentrationen i Drastrup

Grundet stoftransportmodellens opsætning, er det ikke muligt at anvende den beregnede tidshorisont for en 50% reduktion af nitratkoncentrationen direkte fra modellen, til at forudsige en tidshorisont for en reduktion af nitratkoncentrationen i Drastrup området forårsaget af ændringen i arealanvendelse. Modellens forsimplinger sættes derfor op imod det reelle tilfælde i Drastrup.

Koncentrationen i Drastrup området

I kapitel 1 blev det fundet, at nitratkoncentrationen i det øvre magasin i Drastrup området er ca. $100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. I modellens øvre magasin er koncentrationen sat til 79 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Grundet, at koncentrationen er højere i Drastrup, vil det således tage længere tid at komme under grænseværdien på 50 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Herudover blev det i kapitel 1 fundet, at nitratkoncentrationen i det nedre magasin i Drastrup området er ca. $20 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. I modellen findes en startkoncentration på 79 $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Grundet, at koncentrationen er lavere i det nedre magasin i Drastrup end i modellen, vil det tage kortere tid i Drastrup at komme under grænseværdien.

Udvasket nitrat fra rodzonen

Ved hjælp af den simple model blev indvindingsområdet for Drastrup kildepladser bestemt, hvilket ses illustreret på figur 7.30. På figuren ses det, at det bestemte indvindingsopland hovedsageligt ligger indenfor Helhedsplanområdet, hvor arealanvendelsesomlægningen er foretaget.



Figur 7.30: Indvindingsopland for Drastrup kildepladser bestemt ved den simple model.

Det kan således antages, at den beregnede gennemsnitlige udvaskede nitratkoncentration på 46 $\frac{mg}{L}$ fra rodzonen i 2001 er gældende. Denne tilførte nitratkoncentration er således ikke meget lavere end grænseværdien på 50 $\frac{mg}{L}$, hvorved der vil ske en langsommere reduktion af nitratkoncentrationen end i modellen. I modellen foretages der en reduktion i det udvaskede vand til 0 $\frac{mg}{L}$.

Som ovenstående viser, findes der flere forsimplinger og problematikker, når en numerisk model opstilles på felt skala. 1: Metoden, hvorved det vælges at modellere, den teoretiske forståelse af hvorledes stoftransporten foregår i kalk. 2: Bestemmelse af parametre til modellering, som både kan være afhængig af skala og modellens numeriske gridstørrelse. 3: Bestemmelse af start- og randbetingelser for nitratkoncentrationen. Alle disse forsimplinger og antagelser vil i sidste ende påvirke resultatet. Som ovenstående diskussion beskriver, vil nogle forsimplinger og antagelse medfører en kortere opholdstid for nitrat, og andre på en længere. På denne baggrund vurderes det, at der er en stor usikkerhed på den bestemte tidshorisont for en reduktion af nitratkoncentrationen i Drastrup. Kalk er et komplekst materiale, hvorfor stoftransporten er kompliceret. Det er således ikke muligt, med de nuværende metoder til at beskrive stoftransport i kalk, at specificere eksakt, hvornår den målte nitratkoncentration i kalkakviferen er under grundvandskriteriet. Det forventes dog, på baggrund af opstillede modeller og den generelle forståelse for stoftransporten i kalk, at tidshorisonten er i samme størrelsesorden som bestemt ved stoftransportmodellen, altså i størrelsesordenen 100 - 200 år fra 1994.

7.10 Sammenfatning

Det er blevet undersøgt, hvad tidshorisonten er for en startende reduktion af nitratkoncentrationen samt en tidshorisont for en reduktion af nitratkoncentrationen til under den tilladte grænseværdi i Drastrup. Dette er undersøgt vha. en simpel model og en stoftransportmodel. Det er generelt fundet, at med de nuværende metoder til at modellere stoftransporten i kalk, skal der foretages mange simplificeringer og antagelser, hvilket er en hindring for en mere præcis modellering af stoftransporten og derved en hindring for at bestemme tidshorisonterne eksakte. Det vurderes dog på baggrund at målte koncentrationer i Drastrup, modellerede tidshorisonter og den generelle forståelse for strømninger og stoftransport i kalk, at tidshorisonten for en startende reduktion er 10 - 20 år, og at en tidshorisont for en reduktion af nitratkoncentrationen til under den tilladte grænseværdi er i størrelsesordenen 100 - 200 år fra 1994.


For ca. tre årtier siden blev en grundvandsbeskyttelse mod nitratforurening opstartet i Drastrup, grundet målinger af nitratkoncentrationen i det øvre magasin var over den tilladte grænseværdi. Effekten af den foretagede grundvandsbeskyttelse, i form af en omlægning af arealanvendelsen fra landbrug til ekstensive driftsformer, ses endnu ikke på målingerne i kalkmagasinet. På baggrund af denne problemstilling blev projektets hypotese opstillet:

Årsagen til den manglende synlige effekt på målte nitratkoncentrationer i grundvandsmagasinet på trods af en ændret arealanvendelse skyldes, at geologien i oplandet hovedsageligt består af opsprækket kalk.

Til besvarelse af hypotesen blev tre arbejdsspørgsmål opstillet, disse besvares nedenfor:

Hvilken indflydelse har skalaen på bestemmelse af parametre til numerisk modellering af grundvandsindvindingen i Drastrup?

Til at bestemme de hydrogeologiske og stoftransport parametre, som er bestemmende for strømninger og stoftransport i kalken i Drastrup udføres tre forsøg på tre forskellige skala.

Ved strømningsforsøg på lille skala (5 cm) findes et overordnet indblik i parametrenes størrelsesorden. Den gennemsnitlige mættede hydrauliske ledningsevne bestemmes til $5,20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Det findes, at der på lille skala er en stor variation i de bestemte hydrauliske ledningsevner, da denne er stærkt afhængig af mængden og størrelsen af sprækker i de intakte kalkprøver. Totalporøsiteten bestemmes til 0,44 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. Af forsøget kan det konkluderes, at grundet variationen i de bestemte parametre er det nødvendigt at bestemme parametrene på større skala.

Ved strømnings- og stoftransportforsøget på mellem skala (60 cm) blev primært udvekslingen af stof imellem sprækker og matrice undersøgt. Det findes, at der i kalkblokken forekommer to skalaer af sprækkesystem: små og mellem. Dette fine net af sprækker udgør et stor overfladeareal, hvor diffusionen ind i matricen kan finde sted. Stoftransporten er således stærkt styret af den forekommende udveksling. Det konkluderes således, at det ved modellering af stoftransporten er essentielt at have styr på diffusionsprocessen mellem sprækker og matrice. Grundet en fuldt dynamisk dobbelt porøsitetsmodel er både tids- og udstyrskrævende, forsimples diffusionsprocessen ved tre metoder. Det findes for alle metoderne, at det ikke er muligt at efterligne de målte gennembrudskurver for klorid fuldstændigt. Det vurderes imidlertid, at den mest anvendelige model er en numerisk model med en sorptionsisoterm til at beskrive tilbageholdelsen forekommende ved udveksling mellem de to faser, da kalibreringsprocessen af denne model er lettest. Ydermere bestemmes der for kalkblokken en mættet hydraulisk ledningsevne til $2,60 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$, en effektive porøsitet til $0.03 \frac{cm^3 porer}{cm^3 jord}$ og at dispersionen er lille.

Ved strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala (400 cm) bestemmes den mættede hydrauliske ledningsevne og den effektive porøsitet vha. modellering af gennembrudskurver fra det udførte pushpull forsøg. Parametrene relaterer sig i dette tilfælde til alle tre skalaer af sprækkesystemer: små, mellem og store. Den mættede hydrauliske ledningsevne bestemmes til $1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, den effektive porøsitet til $0,014 \frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ og den longitudinale dispersivitet til 0,15 m.

På baggrund af de tre forsøg kan det konkluderes, at parametrene, som benyttes til at beskrive strømninger og stoftransport, er stærkt afhængige af skalaen. Kalk er et heterogent materiale, og stoftransporten afhænger af størrelsen og antallet af sprækker. Dette medfører, at ved de udførte forsøg på lille og mellem skala at alle sprækkestørrelser, små, mellem og store, ikke nødvendigvis er repræsenteret. Ved bestemmelse af parametre for strømninger og stoftransport i kalk har skalaen derfor en stor indflydelse på resultatet, hvilket der skal tages højde for før en given parameter anvendes til at beskrive strømninger og stoftransport på en anden skala.

Hvilke parametre har den primære effekt på stoftransporten i et dobbelt porøsitet medie?

På baggrund at de tre udførte forsøg er det fundet, at udvekslingen af stof imellem sprækker og matrice er styrende for stoftransporten i kalk. Herved bliver de parametre, som beskriver udvekslingen de vigtigste. I dette tilfælde er disse retentionsfaktoren og mass transfer koefficient samt immobil porøsitet for hhv. modeller, hvor udvekslingen beskrives ved en sorptionsisoterm og ved dobbelt porøsitet. Dette skyldes, at hvis matricen indeholder nitrat vil nitraten blive transporteret med sprækkevandets hastighed, som er høj. Hvorimod, hvis matricen ikke har været forurenet med nitrat før, vil nitraten blive tilbageholdt med op til en faktor 11 i forhold til sprækkevandets hastighed, grundet diffusion ind i matricen.

Hvornår forventes effekten af arealanvendelsesomlægningen at være synlig i Drastrup, og hvornår vil nitratkoncentrationen være under grænseværdien i grundvandsmagasinet?

Effekten af arealanvendelse på nitratkoncentrationen er blevet undersøgt vha. en simpel model og en stoftransportmodel. Det er generelt fundet, at med de nuværende metoder til at modeller stoftransporten i kalk, at der skal foretages mange simplificeringer og antagelser, hvilket er en hindring for en mere præcis modellering af stoftransporten og derved en hindring for at bestemme tidshorisonterne eksakte. Det vurderes dog på baggrund at målte koncentrationer i Drastrup, modellerede tidshorisonter og den generelle forståelse for strømninger og stoftransport i kalk, at tidshorisonten for en startende reduktion er 10 - 20 år og at en tidshorisont for en reduktion af nitratkoncentrationen til under den tilladte grænseværdi er i størrelsesordenen 100 - 200 år fra 1994.

Det kan således konkluderes, at den manglende synlige effekt på målte nitratkoncentrationer i grundvandsmagasinet på trods af en ændret arealanvendelse skyldes, at geologien i oplandet hovedsageligt består af opsprækket kalk.

Litteratur

- Aalborg Kommune og Sven Allan Jensen ApS (2000). *Helhedsplan for nuværende og fremtidig arealanvendelse i Drastrupområdet*. Downloaded den 02.12.2011: http://www.aalborgkommune.dk/Borger/Kultur-natur-og-fritid/Natur/ Skovomraader/Drastrup-skov/Documents/helhedsplan1.pdf.
- Aalborg Kommune, Forsyningsvirksomhederne og Teknisk Forvaltning (2001). Delindsatsplan for området mellem Nibevej og Ny Nibevej. Downloaded den 02.12.2011: http: //www.naturstyrelsen.dk/NR/rdonlyres/4701D10F-6666-429C-978F-C40DDF91F78F/ 0/DelindsatsplanforomraadetmellemNibevejogNyNibevej.pdf.
- Aalborg Universitet (2004). *Geodatabiblioteket*. Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Downloaded den 30.05.2012: http://www.geodatabiblioteket.dk/.
- Beven, K. (2009). *Environmental Modelling: An Uncertain Future?* Routledge. ISBN: 978-0-415-45759-0.
- Claes, N. (2011). Water and chemical transport in limestone: Merging measurement and modelling concepts at different scales. Aalborg University. Master thesis.
- Feast, N., Hiscock, K., Dennis, P. og Andrews, J. (1998). 'Nitrogen isotope hydrochemistry and denitrification within the Chalk aquifer system of north Norfolk, UK'. *Journal of Hydrology* 211:233–252.
- Forsyningsvirksomhederne (2009). Vandforsyningsplan 2009-2020, Vandværker i Aalborg Kommune 2009, Delrapport 2. Downloaded den 02.12.2011: http://www.e-pages.dk/aalborgkommune/220/.
- Gelhar, L. W., Welty, C. og Rehfeldt, K. R. (1992). 'A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers'. *Water Resources Research* 28.(7):1955–1974.
- GEUS (2011). *Jupiter, GEUS*. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, Downloaded den 17.12.2011: http://www.jupiter.geus.dk.
- Gravesen, P., Larsen, C. L., Brüsch, W., Nygaard, E., Klitten, K., Kelstrup, N. og Krüger, H. (2004). Geologi og grundvand. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen, Downloaded d. 20.12.2011 på: http://www.naturstyrelsen.dk/NR/rdonlyres/ 9F27384A-2E02-4E68-8630-AAAF04974566/0/Geologi_og_grundvand.pdf.
- Hansen, L. (1976). 'Jordtyper ved statens forsøgsstationer'. Særtryk af tidsskrifter for planteavl 80:742 – 758.
- Howard, K. (1985). 'Denitrification in a major limestone aquifer'. *Journal of Hydrology* **76**:265–280.
- In-Situ Inc. (2011). Aqua TROLL 200® Level + Temperature + Conductivity. Downloaded den 06.12.2011: http://www.in-situ.com/products/Water-Level/Level-TROLL-Family/ Aqua-TROLL-200-Instrument.

- Jensen, J. B. (2003). *Parameter and uncertainty estimation in groundwater modelling*. Hydraulics & Costal Engineering Laboratory, Aalborg University. ISBN: 0909-4296.
- Jensen, J. B., Thomsen, J. og Hansen, C. V. (2004). AKV Drastrup Grundvandsmodel, Udvidelse af indvindingskapacitet. NIRAS A/S.
- Kyllingsbæk, A. (2008). Landbrugets husholdning med næringsstoffer 1900-2005 kvælstof fosfor - kalium. Aarhus Universitet, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø, Downloaded den 17.01.2012: http://pure.agrsci.dk:8080/fbspretrieve/1509541/intrma18.pdf. Intern rapport.
- Leap, D. I. og Kaplan, P. G. (1998). A Single-Well Tracing Method for Estimating Regional Advective Velocity in a Confined Aquifer : Theory and Preliminary Laboratory Verification.
 Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana and Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Loll, P. og Møldrup, P. (2000). Soil Characterization and Polluted Soil Assessment. Danish Environmental Consulting and Aalborg University. Material for M.Sc. Course.
- Madsen, L. M., Sørensen, M. T., Jensen, O. F., Bransager, K. og Ramhøj, G. (2002). Evaluering og opsamling af planlægningen i Drastrup-pilotprojekt et eksempel på et projekt om grundvandsbeskyttelse og skovrejsning. Aalborg Kommune og Skov & Landskab (FSL), Downloaded den 02.12.2011:

http://www.aalborgkommune.dk/Borger/Kultur-natur-og-fritid/Natur/ Skovomraader/Drastrup-skov/Documents/evalu1.pdf. ISBN: 87-90105-20-6.

- Mortensen, L. og Lorenzen, H. (1999). *Transport og reaktiv iltbarriere i kalkakvifer på Ferslev Byvej*. Aalborg Universitet. Afgangsprojekt.
- Naturstyrelsen, H. (2012). Skov arealer i Drastrup området i 2012. Miljøministeriet. Udleveret materiale.
- NIRAS A/S (2001). Drastrup Projektet Grundvandsmonitering 1998 2001, Sammefatning og erfaringsopsamling. Udleveret materiale.
- Price, M., Downing, R. A. og Edmunds, W. M. (1993). The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe, chap. 3, pp. 35–66. Clarendon Press.
- Spitz, K. og Moreno, J. (1996). A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley & Sons inc. ISBN: 0-461-13687-5.
- Thorsen, G. (1992). 'Sprækket kridt: Gennemstrømningsforsøg'. *Dansk Geoteknisk Forening* 1/3:131–136. NGM-92: Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg.
- Zheng, C. og Wang, P. P. (1999). MT3DMS, A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. Department og Geological Sciences, University of Alabama, Downloaded den 30.05.2012: http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/mt3dmanual.pdf.

APPENDIKS

Fakta om indvindingsboringer i Drastrup

Drastrup kildeplads 1

DGU nr.	Vandværks ID	Anvendelse	Filterdybde
[nr]	[-]	[-]	[m.u.t.]
34. 1695	P1a	Afværgeboring	-
34. 1696	P2a	Afværgeboring	
34. 2364	P1	Vandforsyningsboring	61,0 - 73,0
34. 2366	P2	Vandforsyningsboring	66,0 - 78,0
34. 1697	P3	Vandforsyningsboring	-
34. 1698	P4	Vandforsyningsboring	-
34. 1055	P5	Vandforsyningsboring	15,0 - 40,0
34. 1670	P6	Vandforsyningsboring	-
34. 2855	P7	Vandforsyningsboring	-
34. 2858	P8	Vandforsyningsboring	50,0 - 60,0

Tabel A.1: Boringer til Drastrup kildeplads 1. (GEUS, 2011)

Drastrup kildeplads 2

DGU nr.	Vandværks ID	Anvendelse	Filterdybde
[nr]	[ID]	[-]	[m.u.t.]
34. 1661	-	Vandforsyningsboring	56,5 - 74,5
34. 1662	-	Vandforsyningsboring	56,0 - 74,0
34. 1663	-	Vandforsyningsboring	47,0 - 62,0
34. 1664	-	Vandforsyningsboring	49,0 - 64,0

Tabel A.2: Boringer til Drastrup kildeplads 2. (GEUS, 2011)



De Nationale Geologiske	tionale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland		Udsk	revet 2/2 2012 Side 1
G E U S	BORER	APPORT	DGU arki	vnr: 34. 1705
Borested : Frejlev, Svenstrupvej 2, 9200 Aalborg SV GRUMO 80.11.06.01	Jens Klitgårds grusgrav		Kommune : Aalborg Region : Nordjylla	nd
Boringsdato : 15/2 1988	Boringsdybde : 38 n	neter	Terrænkote : 14.67 n	neter o. DNN
Brøndborer : Karl Sørensen & Sør MOB-nr : 6398 BB-journr : BB-bornr :	n,Frederikshavn		Prøver - modtaget : 15/4 19 - beskrevet : 14/2 19 - antal gemt :	988 antal:8 990 af:OW
Formål : Monitering/kontrol Anvendelse : Monitering/kontrol Boremetode : Skylleboring	Kortblad : 1216 UTM-zone : 32 UTM-koord. : 551134	Kortblad : 1216 INØ UTM-zone : 32 UTM-koord. : 551134, 6318292		EUREF89 Amt GPS
Ro-vand Indtag 1 (seneste) 8.19 metr (første) 7.9 metr	stand Pejledato er u.t. 28/1 2006 er u.t. 15/2 1988	Ydelse 10 m³/t	Sænkning 1.3 meter	Pumpetid

Notater : Boringen formodes anvendt til vandindvinding.



De Nationale Ge	ologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland	Udskrevet 2/2 2012 Side
\$	BORERAPPORT	DGU arkivnr: 34. 170
	meter u.t. I	
	ds -25 SAND , mellem og groft, svagt gruset, gråbrun, kalkh 27 m.	øg gi voldig, "smeltevandssand". Prøve udtaget ved
	− ³⁰ SAND , mellem og groft, svagt gruset, gråbrun, kalkh 33 m.	oldig, "smeltevandssand". Prøve udtaget ved
	gs ⁻³⁵ SAND, mest groft, svagt gruset, gråbrun, kalkholdig, m.	, "smeltevandssand". Prøve udtaget ved 37

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

Udskrevet 2/2 2012 Side 1

			BORER	APPORT	DGU ar	kivnr: 34. 1743
Borested	: Drastrup, b 9200 Aalbo GRUMO 80	oring G1 org SV 0.11.15.01-03			Kommune : Aalbor Region : Nordjy	g Iland
Boringsd	ato : 30/11 1	988	Boringsdybde : 72 r	neter	Terrænkote : 13.92	2 meter o. DNN
Brøndbor MOB-nr BB-journ BB-bornr	rer : Karl Sør : 7339 r :	ensen & Søn,Frede	erikshavn		Prøver - modtaget : 8/2 ⁻ - beskrevet : 13/7 - antal gemt :	1989 antal :16 1989 af :KL
Formål Anvende Boremete	: Moniter Ise : Moniter ode : Skylleb	ring/kontrol ring/kontrol poring	Kortblad : 1216 UTM-zone : 32 UTM-koord. : 551818	INØ 3, 6318364	Datum Koordinatkilde Koordinatmetode	: EUREF89 : Amt : GPS
Indtag 1	(seneste) (første)	Ro-vandstand 9.47 meter u.t. 9.38 meter u.t.	Pejledato 28/7 2010 4/1 1989	Ydelse	Sænkning	Pumpetid
Indtag 2	(seneste) (første)	9.49 meter u.t. 9.37 meter u.t.	23/6 2010 4/1 1989			
Indtag 3	(seneste) (første)	9.41 meter u.t. 9.32 meter u.t.	23/6 2010 30/11 1988	10 m³/t	0 meter	15 time(r)

Notater : Koter fra amtets database LOPIS. Højdesystem usikkert angivet





De Nationale G	De Nationale Geologiske Undersøgelser for		g Grønland	Ud	skrevet 2/2 2012 Side 1
G E [°] U S		BORERA	PPORT	DGU ar	kivnr: 34. 1744
Borested : Drastrup, bori 9200 Aalborg GRUMO 80.1	ing G2 SV 1.16.01			Kommune : Aalbor Region : Nordjy	g lland
Boringsdato : 29/11 198	8	Boringsdybde : 20 m	eter	Terrænkote : 13.92	2 meter o. DNN
Brøndborer : Karl Søren MOB-nr : BB-journr : BB-bornr :	sen & Søn,Freder	rikshavn		Prøver - modtaget : - beskrevet : - antal gemt:	af : G
Formål : Monitering Anvendelse : Monitering Boremetode : Skyllebor	g/kontrol g/kontrol ing	Kortblad : 1216 M UTM-zone : 32 UTM-koord. : 551818,	NØ , 6318366	Datum Koordinatkilde Koordinatmetode	: EUREF89 : Amt : GPS
Indtag 1 (seneste) (første)	Ro-vandstand 9.65 meter u.t. 9.32 meter u.t.	Pejledato 23/6 2010 29/11 1988	Ydelse 5 m³/t	Sænkning 0 meter	Pumpetid 6 time(r)

Notater : Koter fra amtets database LOPIS. Højdesystem usikkert angivet



trup, Alborg Kommunale Vandforsynin SV ig er aflåst Boringsdybde : 18 m istiansen kontrol Kortblad : 1216 ll kontrol UTM-zone : 32 lagboring UTM-koord, : 551900	ng Kor Reg neter Ter - m - be - an - an NØ Dat Koo	mmune : Aalborg gion : Nordjylland "rænkote : 7 meter o ver odtaget : 24/11 19 sskrevet : 21/6 199 ttal gemt : 0	d
Boringsdybde : 18 m istiansen kontrol Kortblad : 1216 ll kontrol UTM-zone : 32 lagboring UTM-koord, : 551900	neter Ter Prø - m - be - an NØ Dat Koo	rænkote: 7 meter o over odtaget : 24/11 19 sskrevet : 21/6 199 ntal gemt : 0	9. DNN 198 antal : 19 19 af : DP/AGR
istiansen kontrol Kortblad : 1216 II kontrol UTM-zone : 32 lagboring UTM-koord : 551900	Prø - mı - be - an NØ Dat Koc	over odtaget : 24/11 19 sskrevet : 21/6 199 ntal gemt : 0	998 antal : 19 99 af : DP/AGR
kontrol Kortblad : 1216 II kontrol UTM-zone : 32 lagboring UTM-koord. : 551900	NØ Dat Koo		
), 6318900 Koc	:um : ED ordinatkilde : An ordinatmetode : KN)50 nt MS digita l e kort
Ro-vandstand Pejledato .57 meter u.t. 7/8 1999 4.6 meter u.t. 10/6 1998	Ydelse	Sænkning	Pumpetid
.57 meter u.t. 7/8 1999 4.6 meter u.t. 10/6 1998	16 m³/t 16 m³/t	1.7 meter 0.6 meter	23 time(r) 24 time(r)
 1.4 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav ved 2 m. Note: Prøven er bl ved 2 m. Note: Prøven er bl 2 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 3 m. 3 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 5 m. 4 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 6 m. Note: enkelt filnifragmenter. 6 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 7 m. 7 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 9 m. 9 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 10 m. 10 KALK/KRIDT, blød, stærkt slav 10 m. 	lammet, hvid, "skrivekridt". Laggr mmet, hvid, "skrivekridt". Laggr mmet, hvid, "skrivekridt". Laggr mmet, hvid, "skrivekridt". Laggr immet, hvid, "skrivekridt". Laggr lammet, hvid, "skrivekridt". Laggr lammet, hvid, "skrivekridt". Laggr	grænse skønnet. Prøve u rænse skønnet. Prøve u grænse skønnet. Prøve u	udtaget ma ma dtaget ved i i dtaget ved i i dtaget ved i i idtaget ved i i dtaget ved i i udtaget ved i i ill avrige i i udtaget udtaget i
	 ¹⁰ KALK/KRIDT, hård, stærkt s ved 11 m, Note: 1 klinkthon prøver. Få flade/skorpe-da 11 KALK/KRIDT, blød, stærkt si ved 12 m. ¹² KALK/KRIDT, blød, stærkt si ved 13 m. 	 ¹⁰ KALK/KRIDT, hård, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Lag ved 11 m. Note: 1 klinitknold (5°8 cm). Kalken er bled men prøver. Få flade/skorpe-dannende bryozoer. ¹¹ KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Lag ved 12 m. ¹² KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Lag ved 13 m. ¹³ KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Lag ved 14 m. 	 ¹⁰ KALK/KRIDT, hård, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve ved 11 m. Note: 1 kflintknold (5°8 cm), Kalken er blød men lettere hærdnet i forhok prøver. Få fladelskorpe-dannende bryozoer. ¹¹ KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve ved 12 m. ¹² KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve ved 13 m. ¹³ KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve ved 14 m. ¹⁴ KALK/KRIDT, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve ved 14 m.



Aflejringsmiljø - Alder (klima-, krono-, litho-, biostratigrafi)



GEUS		BORER	APPORT	DGU arl	(ivnr: 34.229)
Borested : Nibevej, Ålt 9200 Aalbo Boring 2. E	borg Kommunale V org SV Boring er aflåst	andforsyning		Kommune : Aalborg Region : Nordjy	g land
Boringsdato : 12/6 19	98	Boringsdybde : 20 m	ieter	Terrænkote : 8 met	er o. DNN
Brøndborer : Albinus MOB-nr : 31856 BB-journr : 127 155 BB-bornr : B2	Christiansen			Prøver - modtaget : 24/1 ⁷ - beskrevet : 10/6 - antal gemt : 0	l 1998 antal : 22 1999 af : TC
Formål : Moniter Anvendelse : Moniter Boremetode : Tørbori	ring/kontrol ring/kontrol ing/slagboring	Kortblad : 1216 II UTM-zone : 32 UTM-koord. : 551750	NØ , 6318930	Datum Koordinatkilde Koordinatmetode	: ED50 : Amt : KMS digita l e kort
Indtag 1 (seneste) (første)	Ro-vandstand 5.28 meter u.t. 6.15 meter u.t.	Pejledato 7/8 1999 12/6 1998	Ydelse	Sænkning	Pumpetid
Indtag 2 (seneste)	5.28 meter u.t. 6.15 meter u.t	7/8 1999 12/6 1998	6.9 m³/t 16 m³/t	11.7 meter	49 time(r) 94 time(r)
7 Lerspærre 8 Gruskastning 1.4-1.8mm Filter (i2) 0.5mm 12 13 14.5 Gruskastning 14.5 Gruskastning 14.5 Gruskastning 14.5 Gruskastning 14.5 Gruskastning 1.4-1.8mm Filter (i1) 0.5mm	z z k z k z k z k z k z k z k z k	NRD/MALK, Ineget blød, sta kalksten (generett for kalk k kalkmorzene, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 2 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 3 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 5 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 6 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 6 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 8 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 9 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 9 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla udtaget ved 9 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla udtaget ved 10 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla udtaget ved 10 m, RIDT/KALK, meget blød, sta udtaget ved 10 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla ved 11 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla ved 11 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla ved 11 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla ved 14 m, RIDT/KALK, blød, staarkt sla ved 14 m, RIDT/KALK, meget blød, sta ved 14 m,	aarkt slammet, kunning g kridti). Laggrænse rkt slammet, hvid, "si- rkt slammet, hvid, "si- ammet, fint-holdig, hvi- ammet, fint-holdig, hvi- serkt slammet, hvid, "si- met, fint-holdig, hvi- ammet, fint-holdig, hvi- serkt slammet, hvid, "skriveki serkt slammet, hvid, "skriveki serkt slammet, hvid, "skriveki serkt slammet, svagt f 15 m.	ar an An, svägt teret, tys gug skonnet. Prave udtaget ved trivekridt". Laggrænse skonn trivekridt". Laggrænse skonn tritt". Laggrænse skonnet. Pro skrivekridt". Laggrænse skonn tritt". Laggrænse skonnet. Pro skrivekridt". Laggrænse skonn tritt". Laggrænse skonnet. Pro	In , Note: st. Prøve st. Prøve
					fortsætte
15- Gruskastning 1.4-1.8mm Filter (i1)	sk ¹⁵	KRIDT/KALK, meget blød, sta Prøve udtaget ved 16 m. KRIDT/KALK, meget blød, sta	ærkt slammet, flint-ho ærkt slammet, flint-ho	ldig, hvid, "skrivekridt". Lagg Idig, hvid, "skrivekridt". Lagg	rænse skønnet. ma r a rænse skønnet.

 Preve udtaget ved 17 m.
 TKRIDTKALK, meget blød, stærkt slammet, svagt flint-holdig, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Preve udtaget ved 18 m.
 RKIDTKALK, meget blød, stærkt slammet, svagt flint-holdig, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve udtaget ved 19 m.
 RKIDTKALK, blød, stærkt slammet, hvid, "skrivekridt". Laggrænse skønnet. Prøve udtaget ved 20 m. 20-

Aflejringsmiljø - Alder (klima-, krono-, litho-, biostratigrafi)

me	ter	u.t.	
0	-	0.3	terrigen - postglacial
0.3	-	1	glacigen - glacial
1	-	20	marin - maastrichtien

Udtagelse af små intakte prøver

I dette kapitel beskrive hvorledes de små intakte prøver er udtaget som benyttes til strømningsforsøget på lille skala, kapitel 3.

Udtagelsen af prøver

Ni fragmenter udtages fra Mjels Kalkbrud, se figur C.1 for placering. Fragmenterne er udtaget ca. 2,5 m under terræn for at undgå frostsprængninger, hvilket er over grundvandsspejlets placering. Prøverne er punktspecifikke, hvorfor den mættede hydrauliske ledningsevne og den totale porøsitet bestemmes på lokal skala.



Figur C.1: Mjels Kalkbrud samt den lokalitet, hvor prøverne er udtaget.



Figur C.2: Skitse over udtagelsesplaceringen for de ni fragmenter.

Udtagelsen af intaktprøver i kalk foregår utraditionelt. Dette skyldes, at stålcylinderen ikke kan bankes ind i kalken uden at påføre kalkprøven massive sprækker. Intaktprøven vil således ikke repræsentere virkeligheden, hvorfor prøverne er udtaget på følgende måde:

- Fragmenter af kalk udtages fra Mjels Kalkbrud. Orienteringen noteres med en rød nordpil, og fragmentet nummereres. De ni fragmenter er udtaget i en radius af ca. to meter fra kalkblokken. Under udtagelsen af kalkblokken er der noteret hårde lag / markante sprækker i den nordog østlige del, hvorfor der er taget tre fragmenter herfra. Lokaliteten er illustreret på figur C.3, og på figur C.2 ses, hvor prøverne er udtaget.
- Der udtages i alt ni fragmenter. De ni fragmenter er af forskellige størrelse, og der kan derfor evt. udtages mere end en prøve til strømningsforsøget pr. fragment. Såfremt der er mere end en prøve benævnes disse for fragment 3: 3a, 3b, osv. Et fragment er illustreret på figur C.4.
- Prøverne saves til for at passe i det speciallavede udstyr, som kan sammenlignes med en drejebænk. Udstyret med på spændt prøve er illustreret på figur C.5.
- For at sikre at cylinderen let kan drejes op omkring prøven slibes prøven til. Prøven slibes en anelse for stor, således cylinderen fjerner det overskydende lag. Dette gøres for at mindske randeffekter. Figur C.6 viser en tilslebet prøve lige før cylinderen monteres.
- Cylinderen monteres omtrent på midten af prøven, da bunden og toppen af prøven knuses ved monteringen af cylinderen. Cylinderen monteret midt på prøven ses på figur C.7.
- Efterfølgende skrabes prøven til i toppen og bund, og afproppes langs randen for at mindske randeffekter. Prøven afproppes med opslæmmet kalk. Det endelige resultat før prøven monteres i forsøgsopstillingen kan ses på figur C.8.



Figur C.3: Lokaliteten Mjels Kalkbrud, hvor fragmenterne udtages.



Figur C.4: Eksempel på et fragment medbragt fra lokaliteten.



Figur C.5: Prøven monteret i en speciale lavet opstilling. Bemærk, cylinderen under prøven.



Figur C.7: Cylinderen monteret den respektive prøve.



Figur C.6: Prøven efter den er slebet rund.



Figur C.8: Prøven klar til montering i forsøget.

C. Udtagelse af små intakte prøver

Observationer og erfaringer

Følgende observationer og erfaringer er gjort i forbindelse med udtagelse og montering af små intakte kalkprøver.

Udtagelse af fragmenter

Under udtagelsen af fragmenterne i Mjels Kalkbrud er der noteret særligt hårde flader. Disse gør udtagelsen kompliceret, da fragmentet har nemt ved at flække her. Ydermere har det vist sig nærmest umuligt, at udtage fragmenter i flere områder, da kalken smuldrer. Udtagelsen fra væggene i trinet har været ideel, da der her let har kunnet udtages større fragmenter herfra.

Opbevaring

Mellem udtagelsen og udførelsen af forsøget bør fragmenterne holdes fugtige for at forhindre udtørring i den yderste del af fragment. Dette kan gøres i en lukket beholder (spand) eller ved at tildække prøverne med et fugtigt klæde.

Orientering

Under udformningen af prøverne har det ikke altid vist sig muligt at udtage prøven i den ønskede orientering. Det anbefales derfor, at prøverne udtages i en størrelse, der er markant større end stålcylinderen.

Udformning

I forbindelse med udformningen af prøverne til stålcylinderen er følgende observeret:

- Der er til tilskrabningen brugt en massiv skarp metal-genstand megen lig et barberblad. Det er vigtigt for, at bladet ikke river i prøven.
- Prøven skal fastmonteres i stativet før tilskrabningen startes. Det er vigtigt, da det ellers er umuligt at få cylinderen op omkring prøven.
- Det er forsøgt at benytte vand ved montering af cylinderen, men det frarådes, da det blot øger gnidningsmodstanden.
- I starten af tilskrabningen kan der være noteret store sprækker i prøven. Kontroller her styrken af prøven, da den ved montering af cylinderen har let ved at flække her.
- Ved flere af prøverne er der observeret humushuller med organisk indhold. Disse fremgår dog i varierende styrke.
- Ved tilskrabning af prøven er der en hårfin grænse ved mængden, der aftages prøven. Hvis der tages for lidt kalk af, er det umuligt at få cylinderen på, hvis der tages for meget forekommer der randeffekter. Det er herved efter forsøget observeret, at nogle af prøverne stadig har mærker efter slibningen, altså har der været randeffekter. Disse er i top og bund af prøven lukket med opslæmmet kalk.

Ud over ovenstående liste anbefales det, at der udtages en test-prøve til at kontrollere og afprøve teknikken på.

Kontrol af system

Under test-forsøget blev en utæthed i opsætningen noteret. Det bør derfor kontrolleres, at systemet er tæt før opstart af forsøg.

Udtagelse af kalkblok

I dette kapitel beskrives hvorledes kalkblokken, som benyttes til stoftransportforsøget, er udtaget, samt erfaringer og observation ved udtagelsen.

Til stoftransportforsøgets udførelse benyttes en kalkblok af størrelsen (bredde x højde x længde) = (34 cm x 42 cm x 61 cm), se figur D.1 for udformning. For at forsøget holdes virkelighedsnært, ønskes det, at kalkblokken er intakt. Til transportering af kalkblokken fra udtagelsesstedet til laboratoriet, samles en kasse omkring kalkblokken på stedet. For at undgå yderligere påvirkning på kalkblokken, udføres forsøget på kalkblokken i kassen. Dette kræver, at kassen slutter tæt omkring kalkblokken, for at eliminere utætheder og strømninger langs rander. Kalkblokkens sider og top skal derfor være plane og jævne. Bemærk, at blokkens top senere bliver til bund, når forsøget udføres. Ydermere, skal blokkens sider være parallelle. Dette gør det sværere at udtage kalkblokken, da kalk består at matrice og sprækker, hvor kalkens styrke er nedsat i nærheden af sprækker. Som følge af den nedsatte styrke, har kalk let ved at flække på uforudsigeligvis ved påvirkning. Kassen er derfor lavet således, at det muligt at justere bredden på kassen, hvorved det ikke er nødvendigt med et bestemt mål for kalkblokken. Ydermere, er kassens inderside polstret med cellegummi, som er fleksibel og derfor øger tætheden omkring blokken.



Figur D.1: Skitse af kalkblokken med angivne størrelser og navngivning af blokkens flader.

Blokken udtages fra Mjels Kalkbrud, se figur C.1 på side 161 for placering. Grundet frostsprækker i det øverste lag af kalken, udtages kalkblokken fra et dybere lag. Blokken udtages ca. 2 m under kalkbruddets overflade, da det vurderes, at være tilstrækkeligt ud fra observationer i kalkvæggen, se figur D.2. Den røde linje illustrerer overgangen mellem frostsprækket kalk og intakt kalk. Afstanden fra terræn til den røde linje er ca. 1 m. I området står grundvandsspejlet ca. 20 m under terræn, kalkblokken udtages derfor fra den umættede zone. Hullet graves med en gummiged, som ses på figur D.3.



Figur D.2: Kalkvæg

Figur D.3: Udformning af kalktrin.

For at gøre udtagelsesprocessen let laves der med gummigeden et trappetrin i kalken. Grundet maskinens kræfter bryder kalken i overfladen i nærheden af, hvor skovlen har gravet. Den yderste del af trinnet og overfladen fjernes derfor med håndkraft, se figur D.4 for illustration.



Figur D.4: Kalktrinet er markeret med sorte linjer, herudfra udtages kalkblokken. Først fjerne det overfladenære kalk, som er blevet knust at maskinen illustreret med stiplede grå linjer.

Efterfølgende saves to ender ud kalken og overskydende kalken fjernes med spade, spidshakke samt hammer og mejsel, se figur D.5. For at få saven til at glide lettere igennem kalken benyttes vand som sprøjtes på kalken. Det er nødvendigt for at sikre, at saven ikke sidder fast i kalken.



Figur D.5: Den sorte linje er det eksisterende kalktrin efter fjernelse af det overfladenære kalk. De stiplede røde linjer er der, hvor der saves ender ud af kalken. De stribede grå områder er overskydende kalk, som fjernes.

På figur D.6 ses, hvorledes kalkblokken ser ud efter de udført processer.



Figur D.6: Status for kalkblokken efter fjernelse af det overfladenære kalk, udsavning af ender og fjernelse af overskydende kalk.

Herefter saves sider i blokken, hvilket er illustreret på figur D.7. Når siderne er savet, fjernes det overskydende kalk. For at sikre at siderne er parallelle benyttes lineal og vaterpas.



Figur D.7: De stiplede røde linjer viser den hidtidige udformning af kalkblokken. De stiplede grå linjer viser, hvor der saves sider, og de stiplede område viser overskydende kalk, som fjernes.

Da der findes små huller i siderne, hvor kalken er brækket af, udjævnes siderne med opslæmmet kalk i form af opblandet fint kalkpulver og vand. Det opslæmmede valk lukker hullerne i siderne således, der ikke kan forekomme uhensigtsmæssige strømninger langs randen.

Efterfølgende sættes kassens sider på kalkblok, som illustreret på figur D.8. Ved hjælp af vaterpas placeres siderne, så de er i vater på langs samt sidder lige over for hinanden. Siderne spændes fast med skruetvinger.



Figur D.8: Status for kalkblokken, når kassens sider er spændt fast på kalkblokken.

Toppen er kalkblokken saves til, således den er lige og følger siderne. Toppen udjævnes ligeledes med opslæmmet kalk, og der sættes låg på kalkblokken, se figur D.9. For at sikre, at kassens sider bliver siddende tæt og jævnt ind til kalk, skrues ender på kassen. Kalkblokken saves ud under kassen således, at kalkblokken er helt fri.



Figur D.9: Status for kalkblokken, når kassens låg og ender er skuet fast.

Kalkblokken vippes rundt således, at toppen af kalkblokken bliver bund, se figur D.10.



Figur D.10: Kalkblokkens udseenden efter den færdige udtagelse.

I forbindelse med vipningen, brækkes noget af toppen af, se figur D.11



Figur D.11: Toppen af kalkblokken er ujævn, da noget af kalken er brækket af, da blokken vippedes rundt. Ydermere, kan de ses af kalkblokken forekommer mere sprækket i den højre ende. Dette skyldes, at en skruetvinge blev spændt for hårdt.

Kalkblokken flyttes med gummiged og truck grundet blokkens vægt.

Observationer og erfaringer med udtagelse af kalkblok

Variation i kalkens styrke

I forbindelse med udtagelse af kalkblokken bemærkedes det, at kalkens styrke varierer meget lokalt. I det øvre højre hjørne af kalkblokken på figur D.6 forekommer kalken porøs, og kalken flækker let ved udsavningen.

Kalkblokken tørrer ud

Udtagelsen af kalkblokken tog fire dage for gruppens to personer. Kalkblokken stod derfor længe frit. Det blev i denne forbindelse bemærket, at kalken tørrede ud i overfladen. Blokkens overflade bliver derfor porøs og får større tendens til at sprække, når der saves i den.

Det er derfor vigtigt, at minimere tiden brokken udtages over, og det er en god ide at tildække kalkblokken med et fugtigt tæppe, når der ikke arbejdes på udtagelsen.

Brug af vand ved savning

Saven glider nemmest igennem kalken med vand. I denne forbindelse dannes der opslæmmet kalk, som er meget klæbrig. Vandet benyttes som smørelse for at sikre, at saven ikke sætter sig fast i kalken. Blokken bliver let fugtig, og det frarådes derfor at stille genstande på blokken, da disse let klistrer sig fast.

Savning af sider og ender

Når kalkblokken saves ud, er det en god ide at starte med for store størrelsesmål således, det er muligt at placere blokken på forskelligvis. Kalken i udtagelsesstedet læres herved at kende, og det findes ud af, hvor det er bedst at udtage blokken.

Ønskes det at justere kalkblokken størrelse, skal det bemærkes, at det ikke er muligt at save 1 - 2 cm af en side, og det er heller ikke muligt at justere på en side, hvis den er blevet skæv. Det er dog muligt, at save en ny side ca. 5 cm længere inde i blokken. Det er derfor vigtigt, at få ordentligt startet på savning, så blokkens sider bliver parallelle og bunden er vinkelret på siderne.

Sprækker i kalken

Sprækkerne i kalken kan fremstå meget synlige. Overfladens farve adskiller sig fra kalken, samt fladen i en sprække kan forekomme glat formodentligt pga. vandets strømning.

Påsætning af kassens sider med skruetvinger

Ved fastspænding af skuetvinger for at fastholde kassens sider, bliver skruetvingerne spændt så meget, at kalken i den ene ende blev påvirket, se figur D.11. Dette var dog uundgåeligt, da de medbragte skruetvinger var for korte.

Vipning af kalkblok

Ved vipningen flækker noget af toppen af kalkblokken. Det vurderes umiddelbart, at det kan skyldes, at der ved udsavningen under kassen blev benyttet meget vand, hvorved der er blevet dannet meget klæbende opslæmmet kalk. Dette kunne evt. have været undgået ved at presse en tynd metal plade med ind under løbende i forbindelse med savningen.

Standardkurver for måleudstyr

I forbindelse med stoftransportforsøg på kalkblok, beskrevet i kapitel 4, benyttes ledningsevnemåler til at monitere kloridkoncentrationen i tønden, kar 1 og kar 2. Før at disse kan benyttes laves standardkurver for at omsætte den målte ledningsevne til en kloridkoncentration i vandet. Det skal bemærkes, at ikke alle standardkurver opgives i dette appendiks. I bilag E.4.3 findes alle standardkurver for elektroden.

Standarder

Før forsøgets opstart og løbende under forsøget laves en serie af standarder, som dækker målingsintervallet. I dette tilfælde er fra 1 ppm til 10,000 ppm klorid. Standarderne laves ved seriel fortynding af stamopløsning. Traceren ved stoftransportforsøget på kalkblokken er natriumklorid (NaCl), derfor benyttes NaCl ligeledes til at lave standarder.

Der laves således en stamopløsning på 10,000 ppm Cl svarende til $10 \frac{g Cl}{L \text{ demineraliseret vand}}$. Til en sådan opløsningen bruges:

$$X \frac{g \text{ NaCl}}{L \text{ demineraliseret vand}} = 10 \frac{g \text{ Cl}}{L \text{ demineraliseret vand}} \cdot \frac{58,44 \frac{g \text{ NaCl}}{\text{mol NaCl}}}{35,45 \frac{g \text{ Cl}}{\text{mol Cl}}}$$

$$= 16,485 \frac{g \text{ NaCl}}{L \text{ demineraliseret vand}}$$
(E.1)

Saltet kommes i en 1L's målekolbe og tilsættes demineraliseret vand op til 1L. Før kolben fyldes helt, sørges der for, at saltet er helt opløst.

Ud fra stamopløsningen tages 100 mL med målepipette, som kommes i en 1 L's målekolbe. Demineraliseret vand tilsættes op til 1 L, og der sørges igen for, at saltvand og demineraliseret vand er blandet før kolben fyldes helt. Herved haves en opløsning på 1,000 ppm Cl. På lignende vis laves 1 L's målekolber med 100 ppm Cl, 10 ppm Cl og 1 ppm Cl.

Den første serie af standarder, der er blevet lavet, blev dog lavet ud fra en stamopløsning på 20,000 ppm Cl. Denne serie af standarder bliver derfor ligeledes benyttet til udformning af de første standardkurver for ledningsevnemålere.

Grundet der forventes betydelige målinger ved forsøget i koncentrationsintervallet 1,000 ppm Cl til 10,000 ppm Cl, laves yderligere nogle standarder med kloridopløsningen 4,000 ppm Cl, 6,000 ppm Cl og 8,000 ppm Cl. Det skal bemærkes, at disse ikke laves ved seriel fortynding.

De ovennævnte standarder benyttes til at lave standardkurver for ledningsevnemålerne.

Kontinuert EC-meter

Under hele forsøgets udførelse haves et EC-meter, som kontinuert måler ledningsevnen i kar 2. I tabel E.1 ses en middelværdi for 30 målinger af ledningsevnen for den enkelte standard, målt over et interval af 30s. I denne forbindelse er det fundet, at dette EC-meter ikke kan måle koncentrationer mindre end 200 ppm.

Kloridopløsning	Ledningsevne	Hældning	Skæring
[ppm]	[mV]	[-]	[-]
200	0,91	-	-
1000	1,46	0,00068	0,776
2000	1,91	0,00045	1,007
4000	3,03	0,00056	0,782
6000	3,87	0,00042	1,350
8000	4,34	0,00023	2,477
10000	4,60	0,00013	3,303

Tabel E.1: Middelværdier for 30 målinger af ledningsevne for de enkelte standarder med en given kloridopløsning. Hældning og skæring beskriver den lineære interpolation mellem målepunkter.

På figur E.1 ses standardkurven for EC-meteret. Det ses, at kurven ikke forekommer lineær, hvorfor det er valgt at lave lineær interpolation mellem målepunkter. Denne interpolation benyttes til at omsætte ledningsevnen til en kloridkoncentration.



Figur E.1: Standardkurver for det kontinuert EC-meter.

Grundet EC-meteret forekommer upræcist, benyttes dette kun til at give indikation på ændringer.

Manuelt EC-meter

Hver dag under forsøget måles koncentrationen i tønden, kar 1 og kar 2 med det manuelle EC-meter en eller flere gange.

I tabel E.2 ses den målte ledningsevne for de enkelte standarder. Det ses, at den målte ledningsevne for en given standard har ændret sig fra den 15-11-2011 til den 07-12-2011. Dette skal der korrigeres for, når ledningsevne omsættes til en kloridkoncentration.

Kloridopløsning	Lednings	evne $\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$
[ppm]	15-11-2011	07-12-2011
10	38	-
100	343	343
1000	3200	3240
4000	11930	12110
6000	17380	17680
8000	22700	23100
10000	28000	28300

Tabel E.2: Målte ledningsevne for standarder.

På figur E.2 se standardkurver for det manuelle EC-meter. Det ses, at korrelationen for den lineære regressionslinje er tilnærmelsesvis 1 for begge kurver.



Figur E.2: Standardkurver på manuelt EC-meter.

Elektrode

Grundet, at det kontinuert og manuelle EC-meter måler på en generel ledningsevne af vandet, kan andre salte end NaCl have indflydelse på den målte ledningsevne, og derved den tilhørende koncentration. Ydermere, er der risiko for, at disse EC-metre kan springe, således de ikke længere passer med den udførte standardkurve. Det er derfor valgt, at foretage målinger med en elektrode, som måler koncentration af klorid præcist. Ud fra elektrodens målinger kan EC-metrenes målinger kontrolleres, og dataene kan korrigeres.

Hver dag i forbindelse med forsøget udtages vandprøver af 50mL fra kar 2, og løbende tages der vandprøver fra tønden og kar 1. Disse vandprøver analyseres vha. elektroden ugentligt.

Før analysen kan fortages udføres følgende proces:

- 1. Elektroden vækkes i 1,000 ppm Cl i ca. 10 min.
- 2. Det kontrolleres, at elektroden er klar til at brug, ved at lave en slopetest. I et 200 mL bægerglas tilsættes ca. 100 mL demineraliseret vand. Med målepipette udtages og tilsættes 1 mL af standarden 1,000 ppm Cl. Ydermere udtages og tilsættes 2 mL 5 molar ISA. Under omrøring med magnet sænkes elektroden ned i væsken. Når målingen er stabil aflæses værdien. Den aflæste værdi svare til "1"i tabel E.3. Efterfølgende udtages og tilsættes 10 mL af samme standard. Ledningensevnen aflæses, denne værdi svare til "2"i tabel E.3. Forskellen i de to noterede værdier svarer til slopen. Denne værdi skal være mellem 57 og 62 for, at elektroden er klar til brug.
- 3. Hvis slopetesten er ok, laves en standardkurve for elektroden. Der udtages mindst tre relevante standarder som er lavet ved seriel fortynding. Ud fra hver standard tages 50 mL med

fuldpipette, som hældes i et 80 mL bægerglas. Der tilsættes 1 mL 5 molar ISA. Under omrøring med magnet aflæses ledningsevne for den givne standard. På figur E.3 ses standardkurver for elektroden.

	Dato	Ledn	ingsev	ne [mV]	
	[dd-mm-åååå]	1	2	Slope	
	15-11-2011	107	48	59	
	23-11-2011	106	48	58	
	30-11-2011	109	51	58	
	07-12-2011	110	53	57	
					•
200 150 100 50 -		4			 ◆ 15-11-2011 y = -23,761n(x) + 157,6 R² = 0.9982 = 23-11-2011 y = -23,561n(x) + 153,5 R² = 0.9999 ▲ 30-11-2011
					y = -25,06ln(x) + 168,57 $R^{2} = 1$ × 07-12-2011 y = -23,89ln(x) + 161,67 $R^{2} = 0,9999$
-50 -					
1	10 1 Kloridoplø	00 sning [ppm]		1000	10000

Tabel E.3: Resultater af slopetest

Figur E.3: Standardkurver for elektrode.

Elektroden er nu klar til at analysere på udtagne vandprøver fra forsøget.

50 ml af vandprøven hældes i et 80 mL bægerglas. Der tilsættes 1 mL 5 molar ISA med målepipette. Under omrøring med magnet aflæses ledningsevnen og noteres. Vandprøverne opbevares efterfølgende på køl.

Simpel modelopbygning

Følgende appendiks knytter sig til kapitel 5, strømnings- og stoftransportforsøget på stor skala. Gennemgangen af den simple modelopbygning fremgår her for at øge overblikket i kapitel 5.

Grundvandsmodellen i GMS 8.1 benyttes til at bestemme indvindingszonen for de fastmonterede pumper. Den simple model er opbygget i 3D med en samlet størrelse på (længde, bredde, dybde) = (100 m, 50 m, 60 m). Modellen er opbygget med en mindste gridstørrelse på (længde, bredde, dybde) = (0,125 m, 0,125 m, 1,0 m) i centrum af en fiktiv boring. Gridstørrelsen vokser herfra med 10% til en maksimal størrelse af (længde, bredde, dybde) = (2,0 m, 2,0 m, 0,5 m). Alle 60 lag er 1 m i dybden. Modellens geometri er vist på figur F.1.



Figur F.1: Modellens gridopbygning. Den gule plet i centrum indikerer den fiktive boring.

Den fiktive boring er filtersat i dybden 3,5 m til 7,5 m samt 9,5 m til 13,5 m under gvs. Pumpeydelsen er $0,0005 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ pr. filtersætning svarende til boring 34. 2289. Da boring 34. 2290 har lignende opsætning er det valgt at tage udgangspunkt i boring 34. 2289.

Parametre

De fem parametre, som der er påkrævet for at opstille en simpel model, er:

- 1. Netto nedbør, bestemt ud fra en middel årlig nedbørsmængde og fordampning.
- 2. Hydraulisk gradient, bestemt ud fra potentialekort.
- Hydraulisk ledningsevne, bestemt ud fra en Cooper-Jacobs test på boring 34. 1696 og 34. 1736. Beregningerne er vedlagt i bilag E.5.4.
- 4. Anisotropi, bestemt med udgangspunkt strømningsforsøget i kapitel 3. Ved øget anisotropi mindskes spredningen mellem lagene, hvorfor denne betragtes som en sikkerhedsfaktor.
- 5. Effektiv porøsitet, bestemt ud fra tabelværdier. Dette gøres, da forsøget er udført før forsøget på mellem skala afsluttedes.

1. Nedbør

Nettonedbøren er valgt til 300 $\frac{\text{mm}}{\text{år}}$ eller 9,16 · 10⁻⁹ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, hvilket ca. svarer til den årlige nettonedbørsmængde i Danmark. Det skal bemærkes, at fastsættelsen af værdien er af mindre betydning, da der blot skal være tilstrækkeligt med vand i modellen for, at beregningen kan gennemføres.

2. Hydraulisk gradient

Den hydrauliske gradient er bestemt ud fra potentialekort fra år 2005. Den hydrauliske gradient er bestemt til 1 m pr. 400 m svarende til en gradient på $0,0025 \frac{\text{m}}{\text{m}}$. Gradienten er valgt, da den repræsentere den stejleste værdi, og derved også den største transporthastighed.

3. Hydraulisk ledningsevne

Den hydrauliske ledningsevne bestemmes vha. Cooper-Jacobs metode (Gravesen et al., 2004). Pumpedata fra Aalborg Vandforsyning den 20. - 21. dec. 2006 benyttes, da det kun er boringerne 34. 1696, 34. 2855 og to afværgeboringer, som har været i brug i denne tidsperiode. Heraf benyttes pumpedata fra boring 34. 1696, som har haft en gennemsnitlig pumpeydelse på 39,44 $\frac{m^3}{t}$ og målinger af vandstandssænkningen fra moniteringsboring 34. 1736 filter to, som ligger 60 m fra boring 34. 1696. Det er kontrolleret, at boring 34. 2855 og de to afværgeboringer ikke har påvirket vandstanden i boring 34. 1736 betydeligt. Sænkningen i moniteringsboring 34. 1736 er vist på figur F.2 for tidsperioden: 20/12/2006 14:00 til 21/12/2006 01:40, hvor boring 34. 1696 har kørt. Pumpningen resulterer i en total sænkning på 11 cm.



Figur F.2: Sænkningen i moniteringsboring 34. 1736.

Transmissiviteten kan således udregnes ud fra ligning (F.1).

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s}$$
(F.1)
$$T = 0.018 \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

For at omregne transmissiviteten til en hydraulisk ledningsevne, er dybden af laget der indvindes fra påkrævet.

For at kontrollere, at der ikke forekommer en lagdeling af kalkakviferen vurderes borehulslogs nær de to monteringsboringer. Denne vurdering er separat i appendiks G, hvor konklusionen er, at der ikke forekommer en lagdeling af kalkakviferen. Ydermere konstateres det, at der forekommer saltvand i kote -45 m svarende til ca. 60 m under terræn. Dybden af laget er ikke nærmere undersøgt.

Den mættede hydrauliske ledningsevne kan bestemmes ud fra ligning (F.2).

$$K_s = \frac{T}{b}$$
(F.2)
= 3,04 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}

Som forudsætning for at Cooper-Jacobs metode kan benyttes til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne, skal ligning (F.3) være opfyldt.

$$u = \frac{r^2 m}{4Tt} < 0.05 \tag{F.3}$$

Det er fundet, at forudsætning er overholdt.

4. Anisotropi

Ud fra forsøg på små intakte prøver er det fundet at kalken i Mjels er anisotropisk med en faktor $\frac{K_{horisontal}}{K_{vertikalk}}$ på 1 til 127. Jo større faktoren for anisotropi er, desto mere vil traceren udbrede sig i den horisontale retning. Da det ønskes, at lade traceren drive mindst 2 m nedstrøms og stadighed have mulighed for at indfange traceren med pumpen, er det derfor sikrest at anvende små værdier for anisotropien for herved at sikre, at det er muligt at opnå den givne afstand. Det vælges derfor, at anvende de to anisotropifaktorer på 1 og 5.

5. Effektiv porøsitet

Den effektive porøsitet er stærkt afhængig af mængden af sprækker. Den effektive porøsitet findes dog at ligge i intervallet 0,01 til 0,05 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$. I et tidligere afgangsprojekt af Claes (2011) findes en effektiv porøsitet på 0,0185 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$ for kalk ved Skovstrup, 8km syd for Aalborg. Herudfra er det valgt at modellere med en effektiv porøsitet på hhv. 0,01 og 0,1 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, som giver største drive tider.

Modelberegninger

Ved at benytte ovenstående model samt parametre udføres en MODFLOW beregning. En samlet liste med parametrene ses i tabel F.1.

Tabel F.1: Parameteroversigt benyttet i den opstillede grundvandsmodel. *Cooper-Jacobs testen knytter sig kun til $3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Den øvre værdi for den hydrauliske ledningsevne er valgt ud fra usikkerhed på bestemmelsen ved Cooper-Jacobs testen.

Parameter	Værdi	Bestemmelsesmetode
Netto nedbør	300 <u>mm</u> år	Skøn
Hydraulisk gradient	$0,0025 \frac{m}{m}$	Potentialekort
Hydraulisk ledningsevne	$3 \cdot 10^{-4} \text{ og } 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Cooper-Jacobs test
Anisotropi	1 og 5	Darcy forsøg
Effektiv porøsitet	0,01 og 0,1 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$	Tabelværdier, lignende kalk

Der tilføres partikelbaner til MODFLOW løsningen. Figur F.3 illustrerer partikelbanerne, som benyttes til at bestemme indvindingsområdet for boringen.



Figur F.3: Partikelbanerne til MODFLOW løsningen illustrerer indvindingsområdet for boringen.

Den længste afstand nedstrøms registreres, og vha. Darcys formel beregnes tiden det vil tage for forureningen at nå afstanden. For at tage usikkerhederne på de ovenstående bestemte parametre med i betragtning laves flere modelgennemkørsler, som alle er listet i tabel F.2.

 Tabel F.2: Oversigt over udregnede drive-længder og tilhørende tid for forskellige parametre. Drivetiden markeret med rød er den mindste tid bestemt.

Hydraulisk ledningsevne	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$3 \cdot 10^{-4}$			
Anisotropifaktor	[-]	1		5	
Effektiv porøsitet	[-]	0,01	0,1	0,01	0,1
Darcy hastighed	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-6}$
Drive-længde	[m]	11,0	11,0	14,0	14,0
Drive-tid	[t]	40,7	407,4	51,9	518,5

Hydraulisk ledningsevne	$\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	$3 \cdot 10^{-3}$			
Anisotropifaktor	[-]	1		5	
Effektiv porøsitet	[-]	0,01	0,1	0,01	0,1
Darcy hastighed	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$
Drive-længde	[m]	1,9	1,9	2,2	2,2
Drive-tid	[t]	0,7	7,0	0,8	8,1

I tabel F.2 ses det, at hvis den hydrauliske ledningsevne er $3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, så vil drive-længde og -tid være meget større end, hvis ledningsevnen blot er en faktor 10 større. Grundet usikkerhed på ledningsevnen, skal dataloggeren tilses ofte således, at traceren ikke driver uden for boringens indvindingsopland.

Kontrol af GMS model

Ved at benytte en simpel beregningsmetode kan stagnationspunktet bestemmes. Ud fra stagnationspunktet kan drive-tiden omregnes. Stagnationspunktet regnes ud fra ligning (F.4).

$$f = \frac{Q}{2\pi \cdot \frac{dl}{dl} \cdot T}$$

$$f = 3,88 \,\mathrm{m}$$
(F.4)

Ud fra ligning F.4 bestemmes et stagnationspunkt på 3,88 m. Ved brug af en hydraulisk ledningsevne på $3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ og en hydraulisk gradient på 0,0025, kan en Darcy hastighed bestemmes til 7,6 $\cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Ved division med en effektiv porøsitet på 0,01 $\frac{\text{cm}^3\text{porer}}{\text{cm}^3\text{jord}}$, kan en porevandshastighed bestemmes og drive-tiden kan beregnes til ca. 14 timer. Sammenholdes denne tid med GMS-modellens resultat haves en tid på 40 timer, hvorved de to modeller stemmer godt overens. Den simple model er på den sikre side.
Lagdeling ved Drastrup kildeplads

I strømningsforsøget på stor skala omregnes transmissiviteten til en hydraulisk ledningsevne. For at denne omregning er gyldig, er det påkrævet, at der ikke forekommer en lagdeling i magasinet. Følgende kapitel har derfor haft til formål at eftervise, at der ikke forekommer en lagdeling ved brug af borehulslogs fra GERDA.

Ud fra borehulslogs kan det konkluderes, at der ikke forekommer en lagdeling af kalkmagasinet i Drastrup. Ydermere kan det konkluderes, at der i kote -45 m forekommer saltvand.

Boringerne, hvor der findes borehulslogs nær Drastrup kildepladserne, er vist på figur G.1.



Figur G.1: Boringer med borehulslogs.



Figur G.2: Borehulslog for boring 34. 1055.

Borehulsloggen fra boring 34. 1055 viser fra flow- og caliper loggen, at boringen er filtersat ca. 17 m under terræn. Flowet er utraditionelt, da der normalt forekommer stort flow i toppen af filteret og aftagende nedefter. Der er på baggrund af flowet ingen grund til at antage en lagdeling.

Ud fra den naturlige gammalog kan det ses, at der efter 10m er et skift i lag. På baggrund af borejournalen vurderes det, at mængden af sort flint har en virkning på den naturlige gammalog. Det kan endvidere ses, at der fra 10 til 23m ikke forekommer en lagdeling af kalken.



Figur G.3: Borehulslog for boring 34. 1656.

Borehulsloggen fra boring 34. 1656 viser et mere karakteristisk billede af både flow- og caliper loggen. Som det fremgår af borehulsloggen er boringen etableret med et standrør de første 13 m fra terræn. Som forventet er indflowet stort nær top af filtersætningen. Caliper loggen indikerer ydermere, at der forekommer en stor diameter, altså sandsynligvis større sprækker fra 13 til 27 m.

Det fremgår af Caliper loggen, at der ikke forekommer store pludselige udsving, hvorfor det kan konkluderes, at der ikke forekommer en lagdeling i kalken ned til 80m. Dette er ønskværdigt i forhold til teorien benyttet i kapitel 5.



Figur G.4: Borehulslog for boring 34. 1664.

Borehulsloggen fra boring 34. 1664 viser et pænt billede af en borehulslog. Borehulsloggen er udført fra 45 til 64 m, og det fremgår af flowloggen, at indflowet er størst nær top af filtersætningen.

Induktionsloggen har nogle markante udsving med ca. 4 m udsving. Disse udsving kan formegentligt relateres til samlingerne i filterrøret, da metal (skruet samlinger) kan giver et udsving i induktionsloggen.

Den naturlige gammalog har ingen større udsving, og det kan derfor konkluderes, at der ikke forekommer en lagdeling i dybden 45 til 64 m.



Figur G.5: Borehulslog for boring 34. 1695.

Borehulsloggen fra boring 34. 1695 viser, at flowet ned igennem filtersætningen er faldende, som forventet. Ydermere viser Caliper loggen en ændring i lag ved kote -9 (15m under terræn). Det fremgår ikke af borejournalen, hvilke lag der findes ved de angivne dybder. Det antages, at der 15m under terræn forekommer kalk.



Figur G.6: Borehulslog for boring 34. 2855.

Borehulsloggen fra boring 34. 2855 viser, at flowet ned igennem filtersætningen er faldende, som forventet.

Caliper loggen viser, at der forekommer ændringer i borehulsdiameteren ned igennem profilet, ergo må der forekomme en variation i antallet og størrelsen af sprækkerne nedad. Det kan også ses, at der ikke forekommer nogen lagdeling over de 80 m.

De store udsving i de restende kurver skyldes saltvand. Der optræder således saltvand ca. 60 m under terræn.



Figur G.7: Borehulslog for boring 34. 2858.

Borehulsloggen fra boring 34. 2858 viser, samme billede som ovenstående boring 34. 2855, nemlig at der ikke forekommer en lagdeling ned igennem profilet. Grundet mangel på caliper loggen er dette vurderet ud fra gamma loggen.

Ligesom for boring 34. 2855 optræder der saltvand ca. 60m under terræn. Det vurderes derfor, at der generelt set forekommer saltvand i kote -45m.



0	25	50	100	15