

## 6. Transient infiltration (flux) og sprække transmisivitet for moræneler

William G. Harrar (GEUS)

### 6.1 Indledning

Dette kapitel sammenfatter resultaterne af metoder, udviklet i KUPA-projektet, hvor data fra monitoring af grundvandsspejlet benyttes til at vurdere: 1) det transiente infiltration til aquiferen gennem moræneleret og 2) sprække transmissiviteten og de hydrauliske egenskaber i matrix i moræneler. Først beskrives en analyse som er udviklet for at bestemme den transiente infiltration gennem moræneler ved hjælp af afsænkingsdata fra langtids pumpetest i overfladenære aquiferer under morænedække. Der næst beskrives resultaterne af en analysemetode som er udviklet til at bestemme både sprække-transmissiviteten i og de hydrauliske egenskaber af morænelerets matrix på basis af kortvarige naturlige fluktuationer i grundvandsspejlet. Begge analyser er testede på data fra Flakkebjerg.

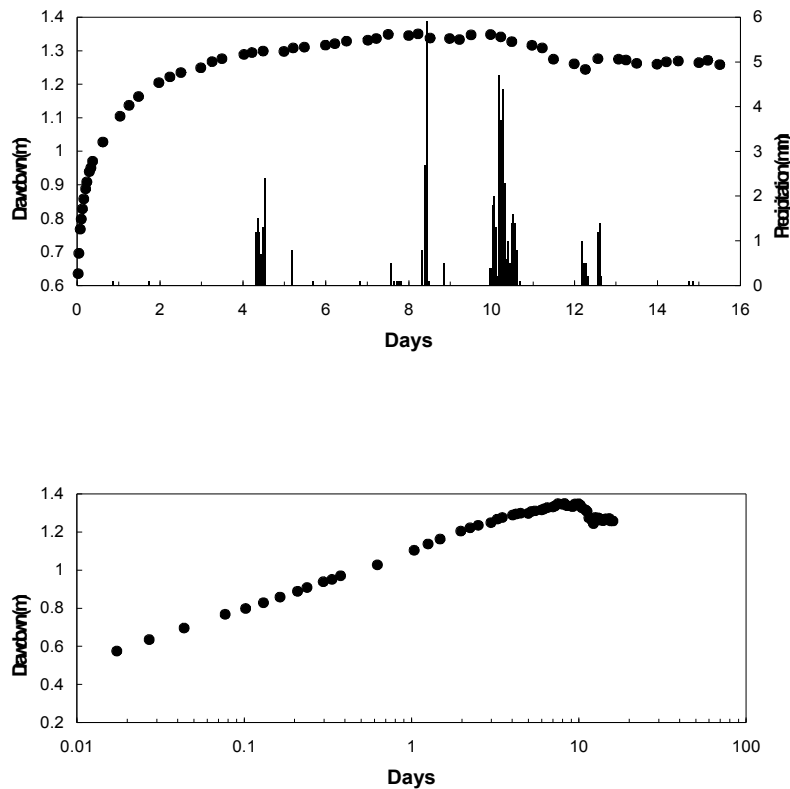
### 6.2 Beregning af transient infiltration til aquiferen gennem moræneler

Der er udviklet en metode til at beregne den transiente infiltration til en underliggende aquifer gennem moræneler gennem en langtids pumpetest. Ved denne metode sammenholdes resultaterne af en typisk pumpetest (Theis typekurve løsning) med effekterne af nettoinfiltration til en regional sandaquifer. Strømningssystemet kan konceptuelt beskrives som en spændt aquifer hvor der ikke foregår nogen strømning hen over grænserne på de tre sider, mens der på den fjerde side foregår udstrømning hen over grænsen ned ad den hydrauliske gradient. I den benyttede sammenhæng svarer grænsen med udstrømning til at vandløbet skærer sig ned gennem hele morænelersdækket og er i hydraulisk kontakt med den underliggende aquifer. Ved modelkørslen bestemmes først aquiferens transmissivitet ( $T$ ) og magaskoefficient ( $S$ ) ved at analysere den tidlige afsækning under pumpning. Herefter analyseres hele pumpetesten ved at fastholde  $T$  og  $S$  for aquiferen og beregne den transiente infiltration til aquiferen som modsvarer den observerede afsækning. Forudsigelserne af infiltrationen til aquiferen svarer til den transiente flux af vand på tværs af aquiferens øvre begrænsning og repræsenterer derfor den lodrette flux af vand gennem bunden af den ovenliggende moræneaflejring. De teoretiske aspekter og en mere detaljeret beskrivelse af analysen af pumpetestene findes i Harrar and Murdoch (indsendt).

#### 6.2.1 Observationer

Nedbør indenfor de 16 dage hvor der forløb en pumpetest i en overfladenær aquifer under et 10-11 m tykt dække af moræneaflejringer medførte at afsækningen ophørte og at der endog skete en lille stigning, figur 6.1. Data viser at Theis løsningen for en spændt aquifer er i god overensstemmelse med den aktuelle afsækning indtil den 3. Dag, mens den

overvurderer afsænkningen gennem resten af testperioden. Den 10. dag er der en skarp ændring i hældningen af afsænkingskurven, hvilket viser at de hydrauliske trykniveau steg under denne del af testen som følge af en længerevarende regnbyge. En tilsvarende reaktion blev også iagttaget i andre monitoringsboringer i aquiferen.



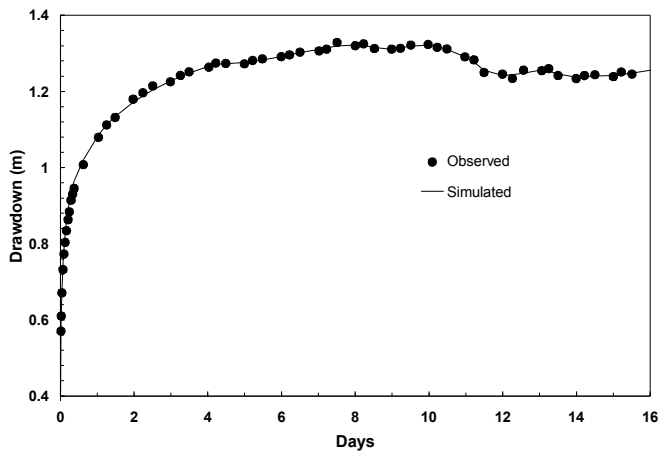
**Figur 6.1.** Den øverste figur viser nedbøren og den observerede afsænkning i aquiferen. Den nederste figur viser et semilogaritmisk plot af den observerede afsænkning.

## 6.2.2 Resultater

Analysen af de tidlige afsækningsdata resulterede i  $T=173 \text{ m}^2/\text{dag}$  og  $S=4 \times 10^{-4}$ . Ved begyndelsen af pumpetesten var trykniveauet i aquiferen cirka 16 m over vandoverfladen i vandløbet (udstrømningszonen), beliggende 3,5 km mod sydvest. Under anvendelse af disse værdier forudsiger analysen at gennemsnitsinfiltrationen til aquiferen forud for pumpetesten var 0,09 mm/dag. Til sammenligning beregnede Henriksen et al. (1998) med en transient strømningsmodel for et område som omfattede Flakkebjerg den gennemsnitlige infiltration til aquiferen til 0,09 mm/dag (32 mm/år).

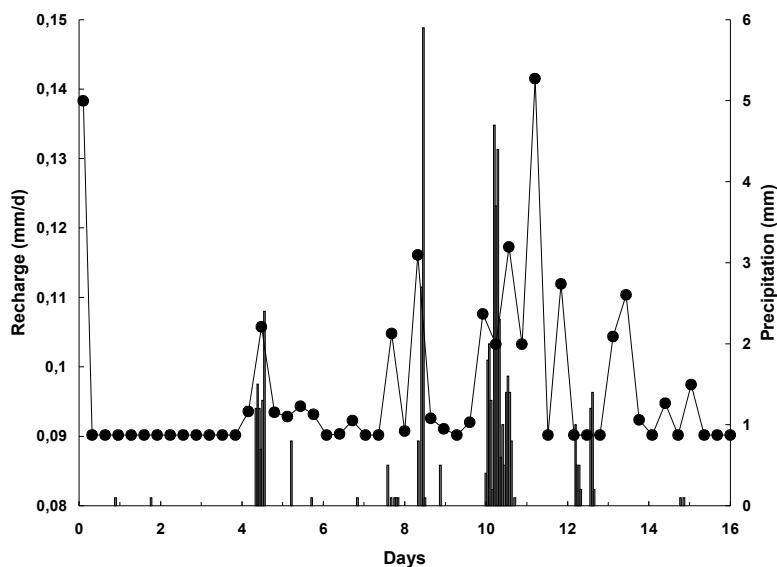
Ved at inkludere effekterne af transient infiltration kan de observerede afsænkninger forudsiges ret præcist, figur 6.2. Analysen forudsiger en stigning af infiltrationen til aquiferen i løbet af de første timer af testforløbet og siden aftog til baggrundsniveauet i løbet af den tredje dag, figur 6.3. Den forudsagte infiltration til aquiferen steg brat i løbet af dag 4 hvor den nåede den højeste værdi på 0,016 mm/dag for derefter at aftage igen. Efter dag 4 er

der forudsagt flere infiltrationspulser til aquiferen. Nogle af disse pulser varer flere dage og den højeste værdi på 0,14 mm/dag forekommer dag 11.



**Figur 6.2.** Observeret sænkning og sænkning simuleret med "pumpning under infiltration" modellen.

De forudsagte infiltrationspulser korrelerer med både nedbørsbegivenheder og kortvarige stigninger i den lodrette trykgradient gennem morænedækket. Nogle af de forudsagte maksimale infiltrationspulser falder sammen med maksimale nedbørsbegivenheder mens andre forekommer med forsinkelse på op til et døgn efter en tilhørende nedbørsbegivenhed (f.eks. korrelerer den store nedbørsbegivenhed dag 10 med infiltrationsmaksimet dag 11).

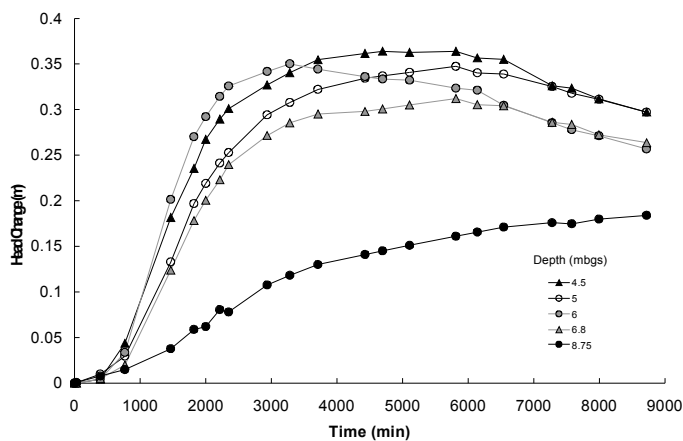
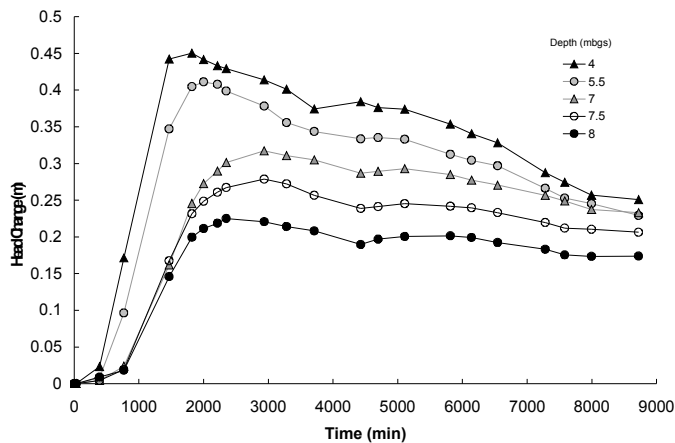


**Figur 6.3.** Simuleret infiltration til den øverste del af aquiferen og den målte nedbør.

Den lodrette hydrauliske trykgradient i dæklaget af moræneler er udregnet på basis af målinger i piezometre med filtre i den øverste meter af aquiferen og på tværs af grundvands-

spejlet i morænelerslaget. Resultaterne er sammenlignet med de forudsagte infiltrationsrater til aquiferen, figur 6.4. Den lodrette trykgradient stiger fra 0,42 til 0,48 i løbet af de første seks timer af testen hvor også resultaterne fra piezometrene forudsiger en stor infiltrationsbegivenhed selv om det er en nedbørsfri periode. Det tolkes at denne infiltrationspuls skyldes dræning af det strømningsmæssigt forbundne sprækkenetværk i morænelersdækket.

Den lodrette trykgradient stiger herefter til 0,52 i løbet af dag 4 hvor modellen forudsiger at der kun foregår "baggrundsinfiltation" til aquiferen. Herefter stiger den lodrette trykgradient gradvist gennem de næste 6 dage i løbet af hvilke to svage stigninger i gradienten svarer til forudsagte stigninger i infiltration til aquiferen dag 5 og 9. Den største infiltrationsbegivenhed som indledes dag 10 modsvarer af en stigning i trykgradienten fra 0,53 til 0,55. Den vertikale gradient aftager gradvist efter denne store infiltrationsbegivenhed og infiltrationen til aquiferen aftager ligeledes. På baggrund af responset af den hydrauliske trykgradient under pumpetesten synes det at morænelersdækket kun afdræner en beskedne vandmængde fra matrix mens den i betydelig grad transporterer den arealudbredte nettoinfiltration fra nedbør.



**Figur 6.4.** Trykvariationer i morænen. Den øverste figur illustrerer de hurtige variationer som viser at disse piezometre er i kontakt med sprækker. Den nederste figur illustrerer de langvarige ændringer som viser at piezometrene er installeret inde i matrixblokke.

Den gennemsnitlige "baggrundsinfiltation" til aquiferen (før pumpetesten) er beregnet som forholdet mellem den forudsagte gennemsnitsinfiltation til aquiferen og den målte lodrette hydrauliske trykgradient i morænelersdækket. Dette forhold er  $2.5 \times 10^{-9}$  m/s hvilket kun er lidt mindre end den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne, beregnet på grundlag af 15 slug tests, i uforvitret moræneler (ca.  $5.0 \times 10^{-9}$  m/s). Forholdet er også beregnet mellem de forudsagte infiltrationsrater til aquiferen og de observerede lodrette gradienter under pumpetesten. Disse værdier afviger lidt fra forholdet mellem forudsagt gennemsnitsinfiltation til aquiferen og den vertikale gradient forud for testen.

Disse resultater viser at størrelsesordenen af den forudsagte infiltation til aquiferen er rimeligt godt fastlagt. Yderligere, idet størrelsesordenen af infiltationen til aquiferen bestemmes af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne i morænelersdækket og den hydrauliske gradient på tværs af morænelersdækket, tyder den hurtige overførsel af infiltationspulser efter nedbørsbegivenheder gennem morænelersdækket til den underliggende aquifer på at strømmingen foregår gennem et forbundet sprækkenetværk. Dette er i overensstemmelse med resultaterne af andre hydrauliske og tracer tests som er gennemført på lokaliteten og dokumenterer samlet at sprækkerne gennemskærer hele morænelersdækket (Harrar et al. indleveret; Jones, 1999; Cartwright, 2001).

### **6.2.3 Anvendelse**

Den beskrevne metode for "pumpning under infiltation" kan bruges til at fastlægge den transiente infiltation til overfladenære aquiferer og til at fastslå om sprækker gennemsætter hele dæklaget af moræneler. Metoden kan i sin nuværende form benyttes som et administrativt værktøj for f. eks vandværker som udnytter grundvand fra overfladenære aquiferer som er overlejrede af moræneler. Analyse af eksisterende monitoringsdata som er indsamlet i nærheden af indvindingsboringer kan give estimater af den transiente infiltation til aquifererne. Estimerne kan benyttes til at fastslå indvindingsoplandet til indvindingsboringerne og til at bestemme hvorvidt og hvor sprækker gennemskærer hele det ovenliggende morænelersdække. Dette vil kunne bidrage til at udpege områder på jordoverfladen hvor anvendelsen af pesticid udgør en potentiel trussel mod de underliggende aquiferer.

Metoden kan også bruges til at beskrive infiltationshistorien i tilfælde hvor der ikke pumpes ved at udnytte tidsserier af pejlinger fra boringsfiltre i overfladenære aquiferer. Anrebsvinklen ville her være at bruge en langtids pumpetest til at karakterisere de generelle hydrauliske parametre i aquiferen og dernæst fastlægge infiltationen ved at inverttere pejledata fra boringer.

## **6.3 Hydrauliske egenskaber bestemt ved naturlige fluktuationer i grundvandet**

Grundvandsstanden i moræneler har typisk sæsonmæssige og nedbørsrelaterede fluktuationer. Observationer af naturlige fluktuationer i grundvandsstanden i forskellige dybder indenfor et morænelerslag over en aquifer kan benyttes til at bestemme sprækkers dybdemæssige udstrækning og til at anslå morænelerets hydrauliske egenskaber. I Keller et al.

(1989) er der anvist en metode til at fastlægge den samlede hydrauliske diffusivitet ( $K/S_s$ ) i sprækket moræneler ved hjælp af sæsonvariationer i grundvandsniveauet. Ved den nye metode som præsenteres her fastlægges sprækketransmissiviteten og de hydrauliske egenskaber i matrix ved at simulere korttids variationerne i grundvandsniveauet ved hjælp af en dobbeltporøsitetsmodel. Dobbeltporøsitetsmodellen som er udviklet af Dr. John Barker (University College of London) simulerer variationer i det hydrauliske trykniveau i forskellige dybder langs en sprække samt i matrix i varierende afstande fra en sprække som følge af ændringer i det hydrauliske trykniveau langs modellens overgrænse. Modellen håndterer at der kan være flere lag og tager dermed højde for sprækketransmissiviteten, den hydrauliske ledningsevne og den specifikke magasinkoefficient i matrix, samt varierende afstand mellem sprækkerne med dybden. Modellen er her brugt til at fastlægge sprækketransmissiviteten og de hydrauliske egenskaber, afledt af nedbørsbegivenheder, i morænelerets matrix ved at simulere de observerede ændringer i hydraulisk trykniveau i forskellige dybder indenfor den reducerede zone i en morænelersbænk. Data over grundvandsstanden er suppleret med særskilte målinger af den hydrauliske ledningsevne i morænelerets matrix og feltobservationer af afstandene mellem sprækker. Dobbeltporøsitetsmodellen er blevet kalibreret ved hjælp af invers teknik for at vurdere sprække transmissiviteten og den specifikke magasinkoefficient i matrix.

### 6.3.1 Observationer

Trykniveauet i grundvandet i moræneleret i Flakkebjerg øges ikke på en ensartet måde efter nedbør. Tvært imod er der stor variation hvor trykniveauet i nogle pizometre i relativt stor dybde stiger og falder hurtigere og indenfor et større spænd af værdier end mere overfladenære pizometre. Ændringerne i hydraulisk trykniveau som følge af to nedbørsbegivenheder er vist for pizometre i forskellige dybder i figur 6.5.

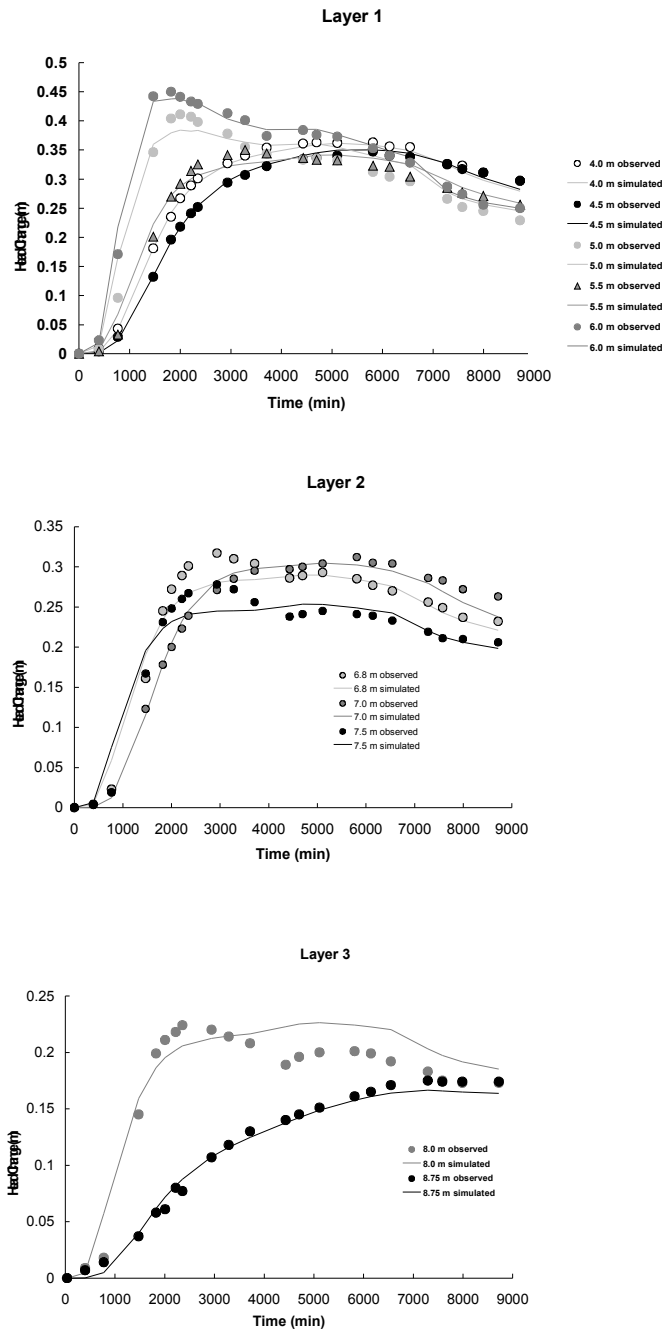
Figuren viser at der er to populationer af kurver. Den ene population kendes på hurtigt stigende og faldende tryk i forbindelse med den første nedbørsbegivenhed, mens trykket efter anden nedbørsbegivenhed enten flader ud eller stiger svagt. Den anden population af kurver kendes på at trykket stiger gradvist til et konstant niveau som efter en periode afløses af langsomt trykfald. Disse forskelle kan forklares ved infiltration gennem overfladerne af sprækker. Kurver for hurtigt fluktuerende tryk afspejler at pizometrene er installeret så der er strømningskontakt til sprækker mens kurver for langsomt og svagt fluktuerende tryk viser at pizometrene er installeret i morænelerets matrixblokke

### 6.3.2 Modellering

Dobbeltporøsitetsmodellen er blevet benyttet til at anslå sprækketransmissiviteten og den specifikke magasinkoefficient i den uforvitrede morænelersmatrix ved at simulere de observerede ændringer i trykket for forskellige dybder i moræneleret. Strømningssystemet udgøres konceptuelt af en enkelt sprække som gennemskærer en permeabel matrix i hele dennes lagtykkelse. Den observerede trykvariation ved bunden af det forvitrede moræneler er benyttet til definition af modellens øvre grænse. Afstanden til modellens nedre grænse er fastsat som uendelig. Den hydrauliske ledningsevne i matrix er holdt konstant på vær-

dien  $2.0E-10$  m/s, som er bestemt ved permeabilitetsmåling i laboratorieforsøg på intakte kerner. For sprækkeafstanden, som antages at stige med dybden, er der anvendt værdier som er observerede i udgravninger på lokaliteten (Klint og Gravesen, 1999) såvel som på andre tilsvarende lokaliteter i Danmark (Klint, 2001).

De kurver som viser hurtigt varierende tryk antages at afspejle trykvariationerne i sprækkekerne mens de kurver som kun viser langsom trykvariation, figur 6.5 antages at afspejle trykvariationen i matrix. For tilfældene med langsom trykvariation tolker modellen også pizometrets afstand fra en sprække.



**Figur 6.5.** Observeret og simuleret trykvariation i moræneleren.

### 6.3.3 Resultater

For at bestemme hvilke parametre der kunne fastlægges konkret og det parameter kompleksitetsniveau (antallet af lag) som trykvariationerne kan forklare er der blevet gennemført et antal inverse modelleringer med dobbelt porøsitetsmodellen og PEST. Resultaterne viser, under forudsætning af de givne kalibreringsdata (trykvariationer), at modellen kan beregne sprække-transmissivitet samt hydraulisk og specifik magasinkoefficient i matrix.

Der er blevet foretaget en serie inverse modelkørsler hvor moræneleret har været opdelt i 1-4 lag for at bestemme hvilket niveau af parameter kompleksitet der kan forklares ved trykvariationerne og for at afgøre hvilke parametre der skal modelleres ved regression. Resultaterne viser at modellen kan angive konkrete værdier af sprække transmissivitet, den hydrauliske diffusivitet i matrix ( $K/Ss$ ) og afstanden mellem piezometre i matrix og sprækken for hver enkelt trykvariationskurve. Modelresultaterne kan yderligere beregnes for konkrete værdier af den specifikke magasinkoefficient i matrix ved at fastholde den hydrauliske ledningsevne i matrix. En vurdering af konfidensintervallerne for de beregnede parametre, og godheden af parameterfittenes afspejling af de målte tryk, viser at de bedste resultater opnås ved at dele morænelersdækket i tre lag. Resultaterne af kørslen af trelagsmodellen sammenfattes i det følgende.

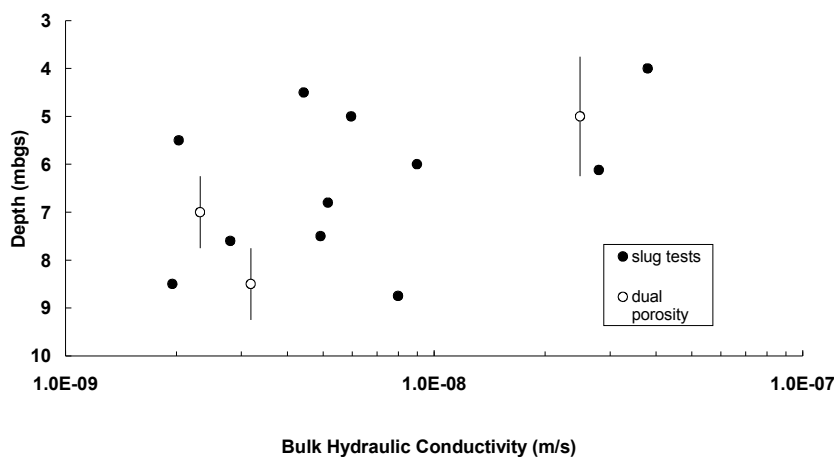
De observerede og simulerede trykvariationer i trelagsmodellen er vist i figur 6.6. Modellen giver en god tilpasning til de observerede tryk, både i sprækken og i matrix i lag nr. 1 og til de observerede tryk i matrix i lag 2 og 3. Modellen undervurderer systematisk de tidlige trykpulser i lag 2 og 3. Den resulterende sum af de kvadrerede residualer er på 0,005 m. De beregnede parametre og deres standardafvigelser er vist i tabel 6.1. Resultaterne viser at såvel sprække transmissiviteten som den specifikke magasinkapacitet i matrix aftager med dybden. De beregnede parametres standardafvigelse er relativt lille, hvilket tyder på at parameterestimerne er nøjagtige. Den beregnede specifikke magasinkoefficient i lag 2 og 3 svarer til værdier som er indhentet i den dybereliggende aquifer. De beregnede afstande mellem piezometre og sprækker virker realistiske. Modelresultaterne er også blevet vurderet ved at sammenligne morænelerets modellerede gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne med resultaterne af in-situ slug-test. Værdierne for den gennemsnitlige modellerede hydrauliske ledningsevne faldet indenfor spændet af de målte værdier, hvilket viser at de beregnede værdier for sprække-transmissivitet er realistiske.

### 6.3.4 Hydraulisk reaktionstid

Den hydrauliske reaktionstid er den tid det varer før der er sket udligning mellem det hydrauliske tryk i midten af en matrixblok og en trykændring i en nærliggende sprække. Denne responstid er en funktion af den hydrauliske diffusivitet ( $K/Ss$ ) i matrix og afstanden mellem sprækkerne. Ved en sammenligning mellem den hydrauliske reaktionstid og varigheden af en transient strømning begivenhed kan det fastslås om strømningssystemet reagerer som et homogent (ækvivalent til et enkeltporøst medium) eller heterogent medie (dobbeltporøst). Hvis den hydrauliske reaktionstid er meget kortere end varigheden af strømning begivenheden viser det at trykket i matrixblokken i det store og hele er i lige-



vægt med trykket i sprækkerne. Under sådanne omstændigheder kan moræneleret opfattes som strømningsmæssigt homogent idet variationer i hydraulisk tryk ned gennem morænelerslaget reflekterer systemets gennemsnitlige hydrauliske egenskaber. I dette tilfælde kan den gennemsnitlige hydrauliske diffusivitet ( $K/S_s$ ) bestemmes på basis af formelsættet fra Keller et al. (1989) i form af en grafisk teknik for amplitudeforhold og faseskift i observerede sæsonvariationer i grundvandets tryk i forskellige dybder. Hvis den hydrauliske reaktionstid er længere end varigheden af strømningsbegivenheden vil det hydrauliske tryk i matrix ikke være i ligevægt med det hydrauliske tryk i sprækkerne, hvorfor systemet vil reagere som en afspejling af heterogene og dobbeltporøse forhold. Under sådanne omstændigheder kan sprække-transmissiviteten og den hydrauliske diffusivitet ( $K/S_s$ ) i matrix udregnes på grundlag af de hydrauliske trykvariationer.



**Figur 6.6.** Beregning af den generelle hydrauliske ledningsevne på baggrund af slug-tests og parametre fra dobbeltporøsitetsmodellen. De lodrette stave ved dobbeltporøsitetsværdierne angiver det dybdeinterval som har været beregningsgrundlaget af de hydrauliske ledningsevner.

**Tablet 6.1.** Beregnede og empiriske værdier.  $T_f$  = sprække transmissivitet, Std. Afv. = standard afvigelse,  $S_s$  = specifik magasinkoefficient,  $K_m$  = matrix hydraulisk ledningsevne, \* = empirisk værdi

Lag	Beregnet $T_f$ (m <sup>2</sup> /s)	Std. Afv. $T_f$ (m <sup>2</sup> /s)	Beregnet Matrix $S_s$ (1/m)	Std. Afv. Matrix $S_s$ (1/m)	$K_m^*$ (m/s)	Sprække afstand* (m)
1	2.7E-08	4.1E-09	1.53E-04	1.15E-05	2.0e-10	1
2	5.1E-09	8.7E-10	1.65E-05	2.71E-06	2.0e-10	2
3	1.1E-08	3.7E-09	4.86E-05	8.21E-06	2.0e-10	3

Den hydrauliske reaktionstid i det uforvitrede moræneler i forsøgsområdet, Flakkebjerg, er ca. 8 dage. Dette viser at de hydrauliske egenskaber i såvel sprækkesystemet som matrix i det uforvitrede moræneler kan beregnes på basis af observationer i forskellige dybder af

korttids variationer i naturligt grundvandsspejl (hydraulisk trykniveau) i forhold til de fluktuationer i grundvandsspejl (stigning og fald) som varer ca. en uge. Moræneler andre steder på Sjælland og Fyn har lignende hydrauliske matrixegenskaber (Nilsson et al., 2001; McKay et al., 1999) og sprækketætheder (Klint, 2001) hvilket viser at disse aflejringer har hydrauliske responstider svarende til dem i Flakkebjerg. Dette indebærer at disse forskellige morænelerslag kan formodes at reagere på samme måde overfor kortvarige fluktuationer i naturlige fluktuationer i grundvandsspejlet som moræneleret på Flakkebjerg lokaliteten, og at sprække transmissiviteten og de hydrauliske matrixegenskaber må kunne beregnes ved ovenstående fremgangsmåde. Resultater af modelkørsler viser yderligere at hele morænelerslaget, hvilket er i overensstemmelse med andre hydrauliske og tracerests som er udført på lokaliteten (Harrar et al. submitted; Jones, 1999; Cartwright, 2001).

### **6.3.5 Nyttiggørelse af analysen af naturlige variationer i grundvandsspejl**

Analyser af naturlige fluktuationer i grundvandsspejl i moræneler kan bruges til at beregne hvor dybt sprækkesystemerne når ned og de hydrauliske egenskaber i både sprækkesystemet og matrix. Disse oplysninger kan udnyttes som input til modellering af strømning og transport i moræneler.

## **6.4 Konklusion**

Undersøgelsen viser at en analyse af grundvandsspejlets korttids variationer i forbindelse med nedbørsbegivenheder kan fortælle hvorvidt sprækker skærer helt gennem et morænelerslag, til at beregne den transiente vandstrømning gennem moræneler ned til underliggende aquiferer og til at beregne sprække transmissiviteten og de hydrauliske matrixegenskaber i moræneler. Med baggrund i kendskab til sprækkedybden i moræneler lettes udpegningen af områder hvor aquiferer under moræneleret kan være sårbare overfor forurening med pesticid. Beregnet vandstrømning gennem morænelerslag og de hydrauliske egenskaber i sprækker og matrix kan bruges som input til modelleringsstudier med henblik på at beregne den samlede pesticidbelastning af underliggende aquiferer.

## **6.5 Litteratur**

Cartwright, D.J. 2001. Using hydraulic testing to determine vertical transport properties of a fractured clay aquitard. M.Sc. thesis. University College of London.

Harrar, W.G. og L.C. Murdoch. Effects of recharge through a fractured confining unit on the performance of a well test. *Journal of Hydrology* (accepteret for publikation).

Harrar, W.G., Nilsson, B., Murdoch, L.C., McKay, L., Klint, K.E. og Gravesen P, Field characterization of a tracer plume in a fractured glacial till. *Hydrogeology Journal* (accepteret pending revision).

Jones, E.H. 1999. Hydraulic characterisation of a fractured clayey till aquitard, western Sjælland, Denmark. M.Sc. thesis, University College of London.

Keller, C.K., van der Kamp, G., og Cherry, J. 1989. A multiscale study of the permeability of a thick clayey till. *Water Resources Research*, 25: 2299-2317.

Klint, K.E. 2001. Fractures in Glacigene Diamict Deposits: Origin and Distribution, GEUS rapport 2001/129.

Klint, K.E. og Gravesen, P. 1999. Fractures and biopores in Weichselian clayey till aquitards at Flakkebjerg, Denmark. *Nordic Hydrology*, 30: 267-284.

McKay, L., Fredericia, J., Lenczewski, M., Morthorst, J., og Klint, K.E. 1999. Spatial variability of Contaminant Transport in a Fractured Till, Avedøre, Denmark. *Nordic Hydrology*. 30: 333-360.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E., Bøggild, C.E. og Broholm, K. 2001. Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till-sandy aquifer system. *Journal of Hydrology*, 243: 162-179.

