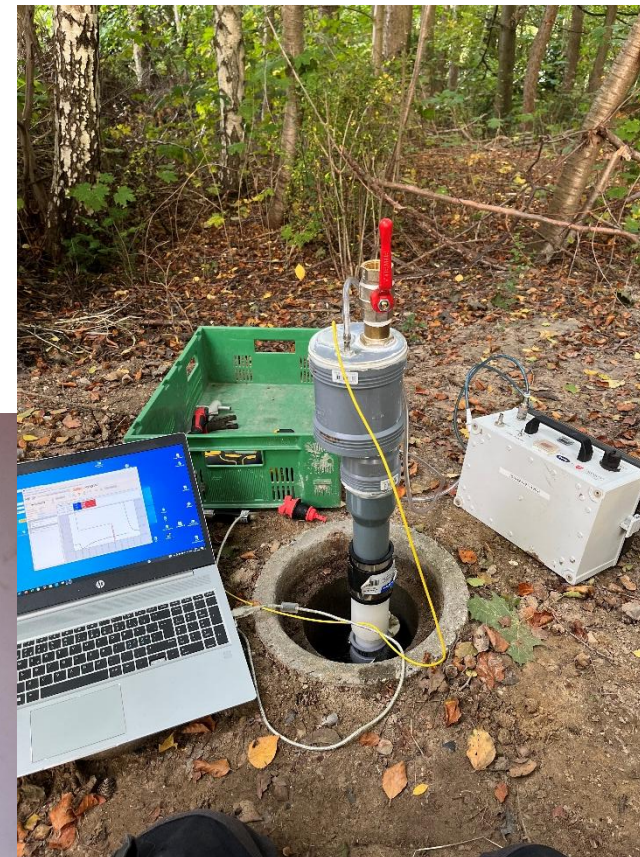
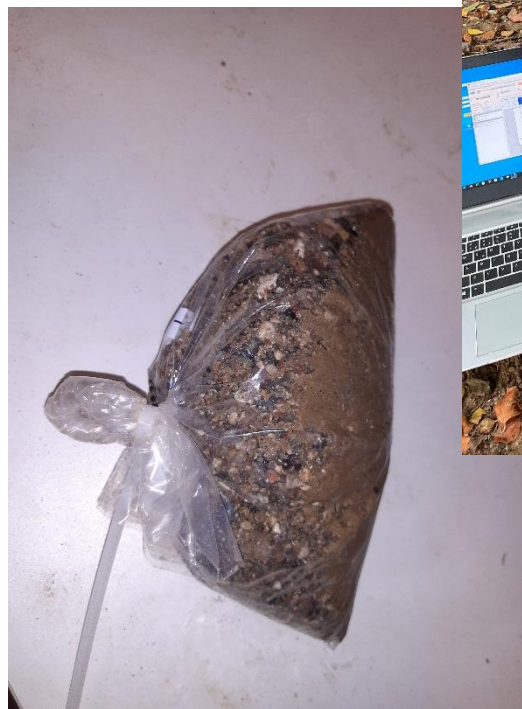


Hydraulisk ledningsevne (K-værdi)

To metoder, (langt hen ad vejen) samme resultat

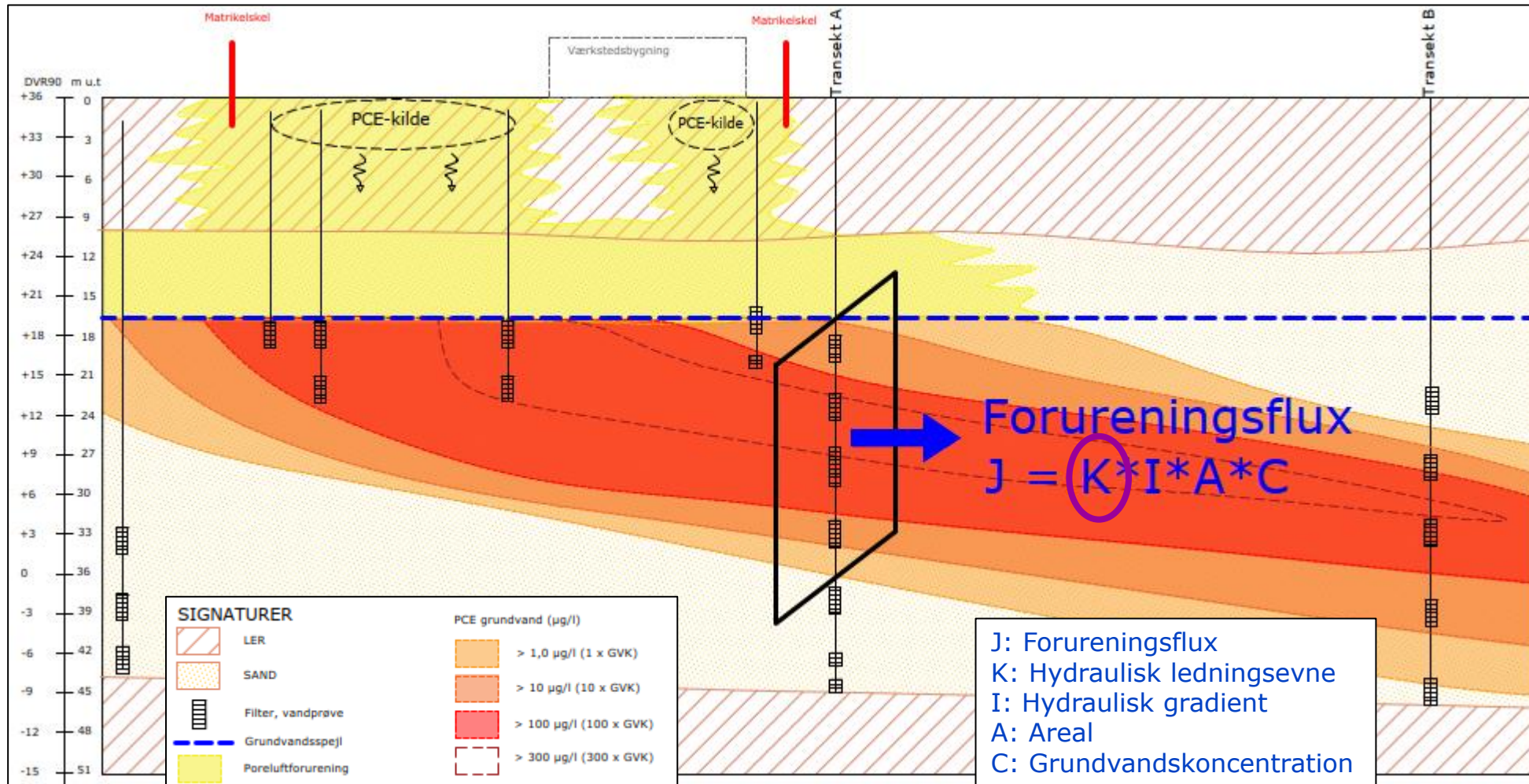
Ellen Prip Bonnesen, Per Loll, Bettina M. Olsen
og Nanna Muchitsch (DMR A/S)

Mette Munk Hansen og Louise Rosenberg
(Region Hovedstaden)



Hydraulisk ledningsevne og risikovurdering

En nøgleparameter og ofte en af de mest "usikre" parametre ved fluxberegninger på afgrænsende grundvandsundersøgelser

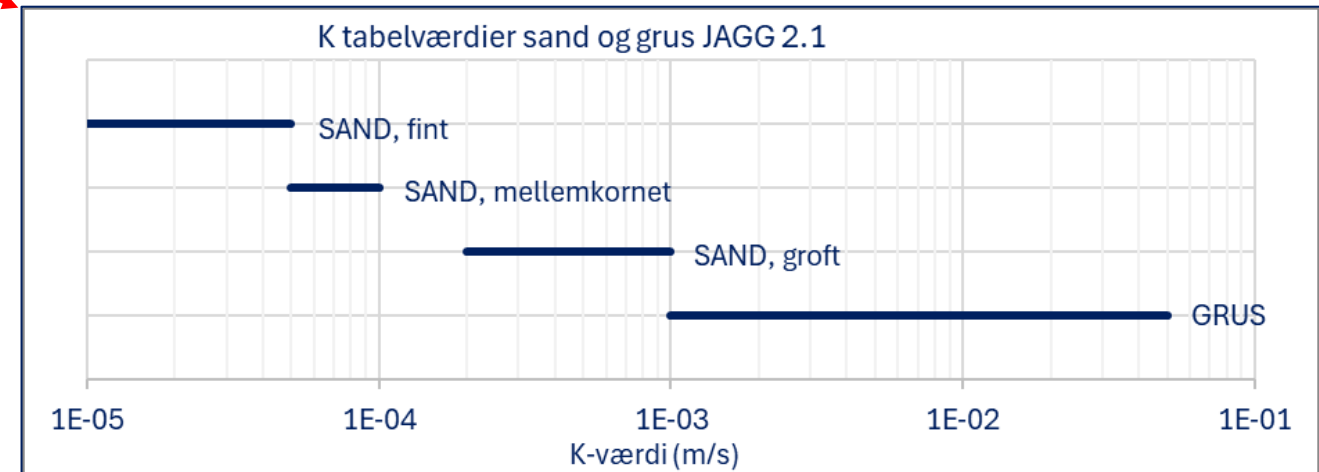


Kan variere flere størrelsesordner

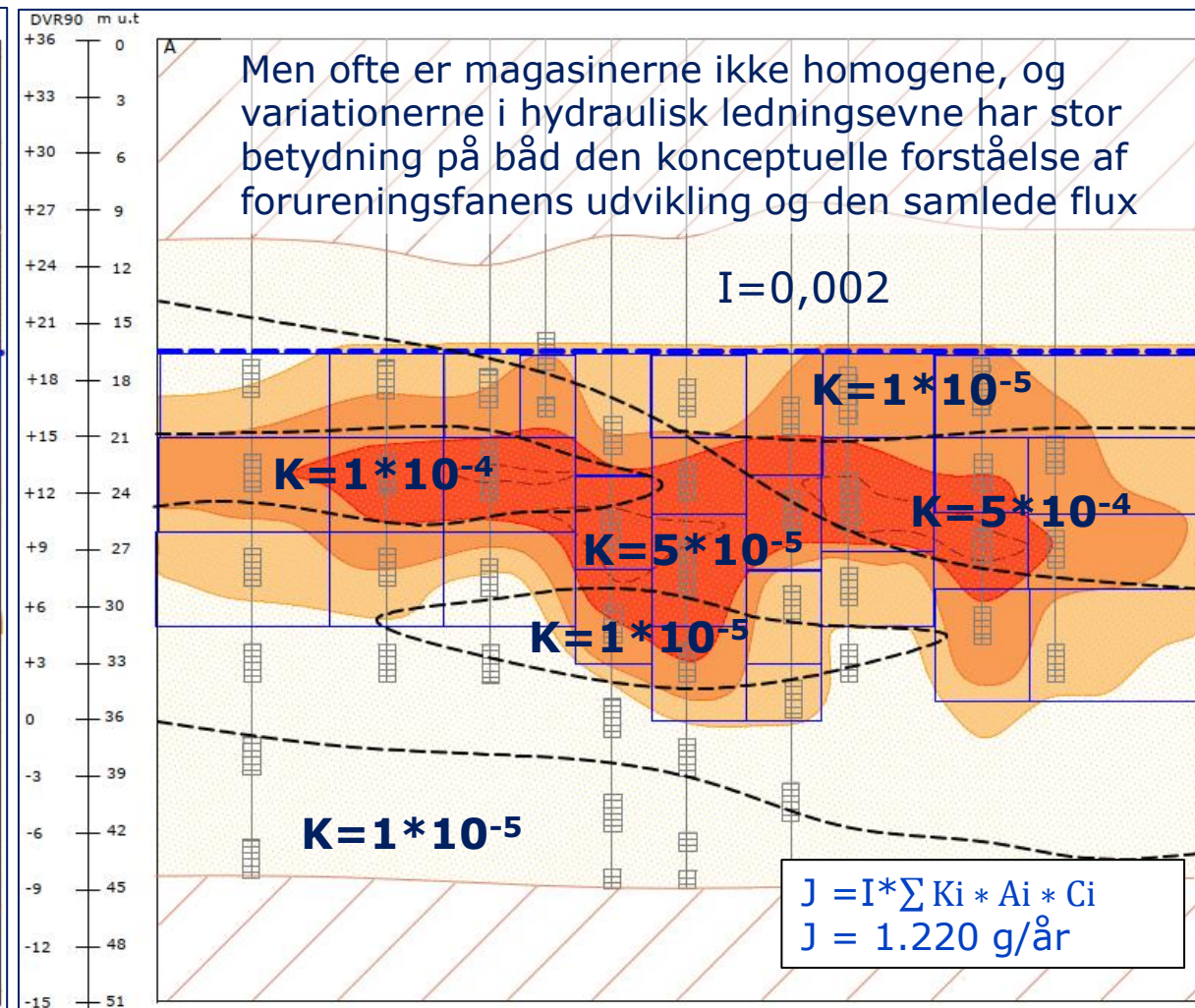
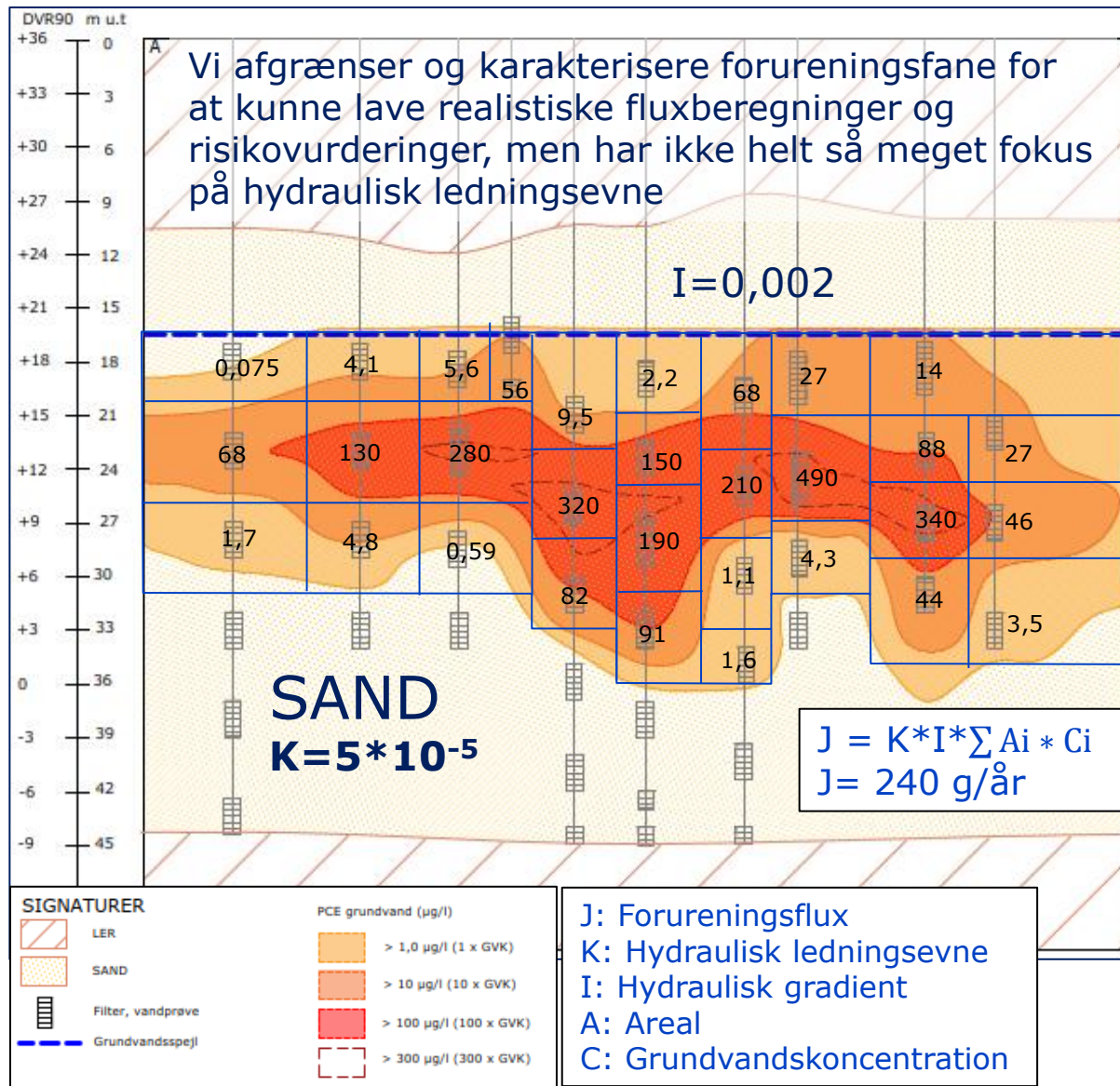
Stor betydning for en robust risikovurdering

Valgliste Tabelværdier – JAGG 2.1

Aquifermateriale	Hydrau. ledningsev. (m/s)		Effektiv porøsitet	
	Interval	Værdi	Interval	Værdi
Lerjorde (overfladenært)	1E-08-1E-06	0.00000001	0,01 – 0,2	0.1
Dybe lerlag	1E-08-1E-02	0.00000001	0,01 – 0,2	0.1
Silt	1E-05-5E-05	0.00001	0,01 – 0,2	0.15
Sand, fint	1E-05-5E-05	0.00001	0,1 – 0,3	0.2
Sand, mellemkornet	5E-05-1E-04	0.00005	0,15 – 0,3	0.2
Sand, groft	2E-04-1E-03	0.0002	0,2 – 0,35	0.25
Grus	1E-03-5E-02	0.001	0,1 – 0,35	0.2
Sandsten	1E-08-1E-05	0.00000001	0,1 – 0,4	0.25
Kalk	1E-07-1E-05	0.0000001	0,01 – 0,24	0.15
Klippe, opsprækket, forvit	1E-08-1E-04	0.00000001	0,1 – 0,4	0.25
Moræneler, 1-1,5 m.u.t.	0.000013	0.000013	0,01 – 0,2	0.1
Moræneler, 2-2,5 m.u.t.	0.0000042	0.0000042	0,01 – 0,2	0.1



Hydraulisk ledningsevne og risikovurdering



Bestemmelse af K-værdi



- Kornstørrelsesfordeling (sigte-/slemmeanalyser)
 - Jordprøve
- Slugtest
 - Ét filter i grundvandsmagasin
- Pumpetest
 - Minimum ét (helst flere) filtre i samme grundvandsmagasin
 - Diameter på pumpeboring stor nok til en ordentlig pumpe

Skala

Lille



Stor

Pris

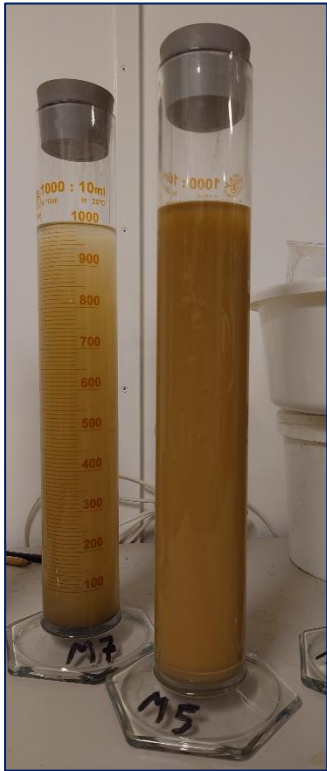
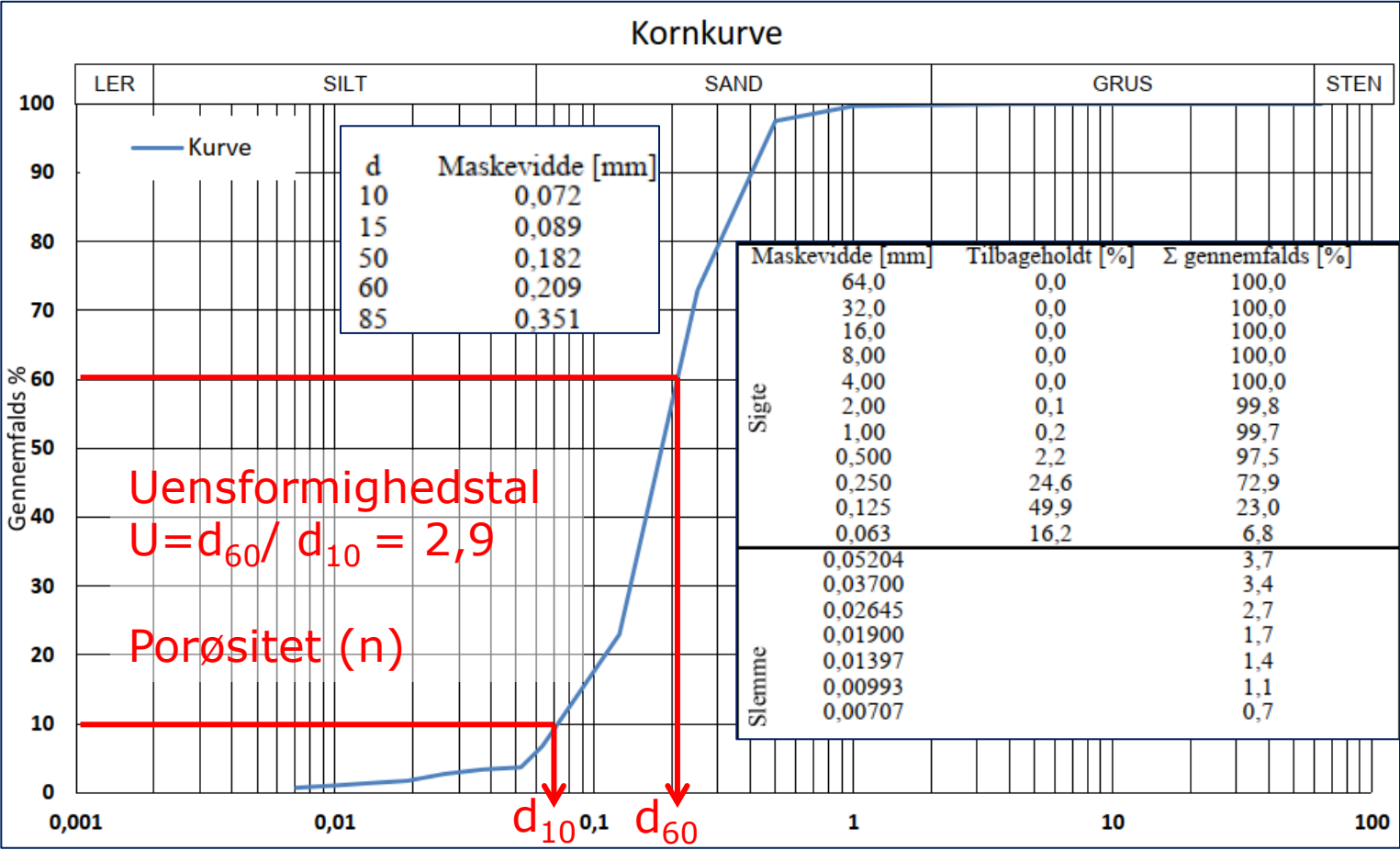
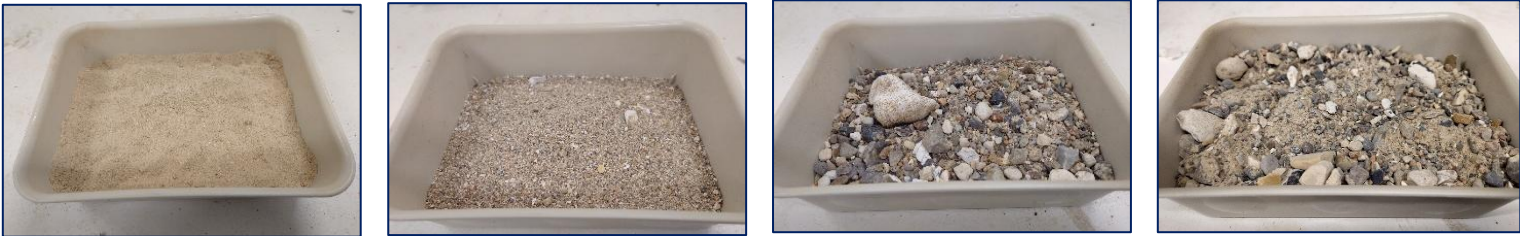
Lav



Høj

Hver metode har deres fordele og ulemper

Sigte-/slemmeanalyse og HydrogeoSieveXL (HGS)



HydrogeoSieveXL

v 2.3.6

Developed by

J.F. Devlin

Dept. of Geology

University of Kansas

Developed April 29, 2014, most recent update November, 2021



$$K = \frac{\rho g}{\mu} N \varphi(n) d_e^2$$

K-værdi fra 15 empiriske formler baseret på forskellige kombinationer af effektive kornstørrelse (d_e) og porøsitet (n) udledt fra kornstørrelsesfordelingerne.

For hver formel er angivet et **"gyldighedsinterval"**, baseret på **forskellige karakteristika**, fx:

- Interval for effektive korndiametre (d_{10} , d_{17} , mv.)
- Ingen kornstørrelser $< xx$ mm
- Interval for uensformighedstal ($U = d_{60}/d_{10}$)
- Interval for beregnet porøsitet (n)
- Mere deskriptive kriterier, fx "groft sand", "naturlig sand med lognormal kornstørrelsesfordeling"

OBS ikke alle formler har angivet et gyldighedsinterval

Source	N	$\varphi(n)$	d_e	Applicable Conditions
Hazen simplified (Freeze and Cherry, 1979)	$100 \frac{\mu}{\rho g}$	1	d_{10}	uniformly graded sand, $n = 0.375$, $T = 10^\circ\text{C}$
Hazen (1892) ^a	6×10^{-4}	$[1 + 10(n - 0.26)]$	d_{10}	$0.01 \text{ cm} < d_{10} < 0.3 \text{ cm}$ $U < 5$
Slichter (1898) ^a	1×10^{-2}	$n^{3.287}$	d_{10}	$0.01 \text{ cm} < d_{10} < 0.5 \text{ cm}$
Terzaghi (1925) ^a	10.7×10^{-3} smooth grains 6.1×10^{-3} coarse grains	$\left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}}\right)^2$	d_{10}	sandy soil, coarse sand
Beyer (1964) ^a	$5.2 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U}$	1	d_{10}	$0.006 \text{ cm} < d_{10} < 0.06 \text{ cm}$ $1 < U < 20$
Sauerbrei (1932) ^a (Vuković and Soro, 1992)	$(3.75 \times 10^{-5}) \times \tau$ $\tau \cong 1.093 \times 10^{-4} T^2$ $+ 2.102 \times 10^{-2} T$ $+ 0.5889$	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	d_{17}	sand and sandy clay $d_{17} < 0.05 \text{ cm}$
Krüger (1919) ^a	4.35×10^{-4}	$\frac{n}{(1 - n)^2}$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta w_i}{d_i}}$	medium sand $U > 5$ $T = 0^\circ\text{C}$

Sigte-/slemmeanalyse og HydrogeoSieve (HGS)



OBS på:

Antal "gyldige" formler i kombination med:

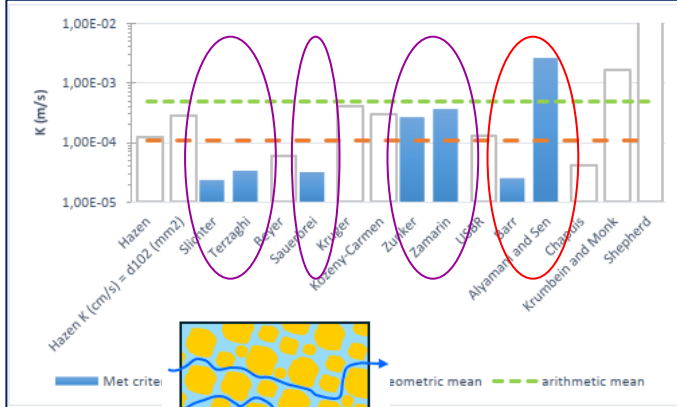
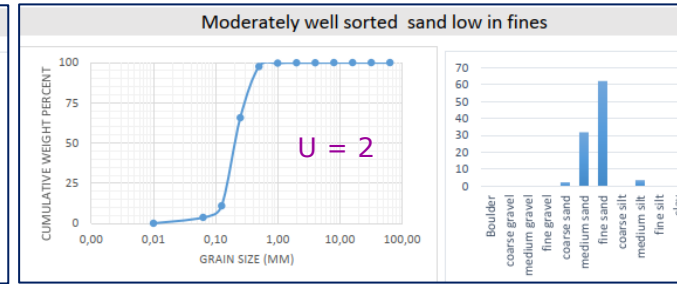
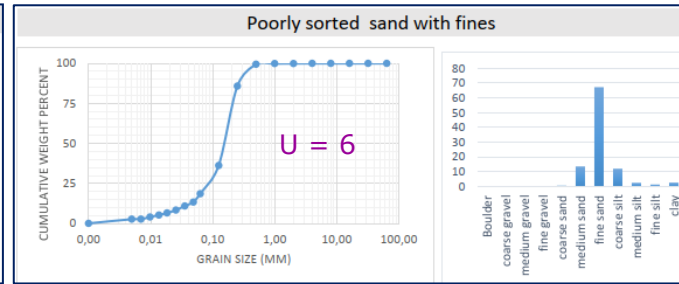
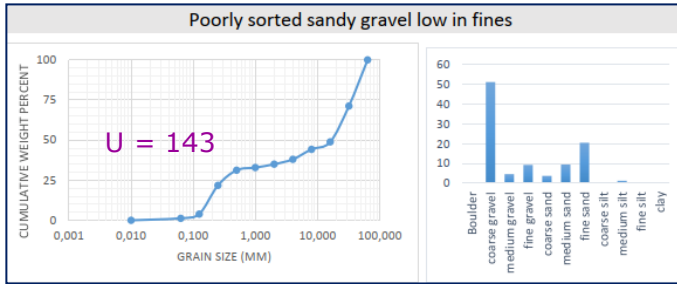
Stor variation i estimat og i geometrisk vs. aritmetisk gennemsnit

"Outliers" iblandt gyldige formler

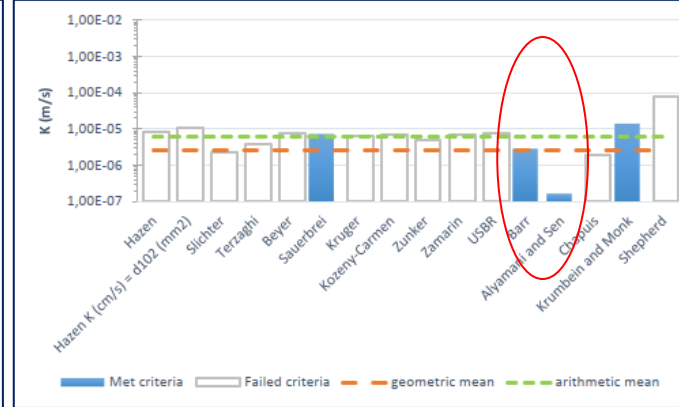
Genbesøg evt. formlernes "gyldighedskriterier"

Intet "gyldigheds-kriterium"

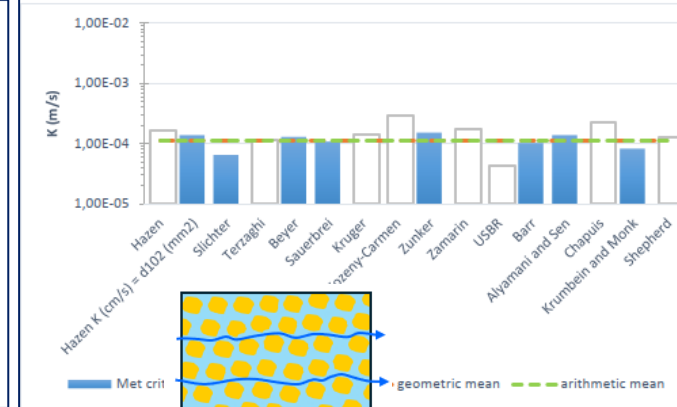
Ingen kriterier for ensformighed (U)



Estimation of	m/s	m/d	de
Hazen K	1,20E-04	10,41	
Slichter	2,37E-03	2,37E-05	2,05
Terzaghi	3,37E-03	3,37E-05	2,92
Beyer	5,97E-03	5,97E-05	5,16
Sauerbrei	3,20E-03	3,20E-05	2,77
Kruger	4,14E-02	4,14E-04	35,76
Kozeny-Carmen	3,03E-02	3,03E-04	26,15
Zunker	2,67E-02	2,67E-04	23,05
Zamarin	3,65E-02	3,65E-04	31,55
USBR	1,33E-02	1,33E-04	11,46
Barr	2,54E-03	2,54E-05	2,19
Alyamani and Sen	2,61E-01	2,61E-03	225,90
Chapuis	4,10E-03	4,10E-05	3,55
Krumbein and Monk	1,65E-01	1,65E-03	142,19
Shepherd	1,74E+01	1,74E-01	15075,61
geometric mean	1,07E-02	1,07E-04	9,28
arithmetic mean	4,80E-02	4,80E-04	41,49



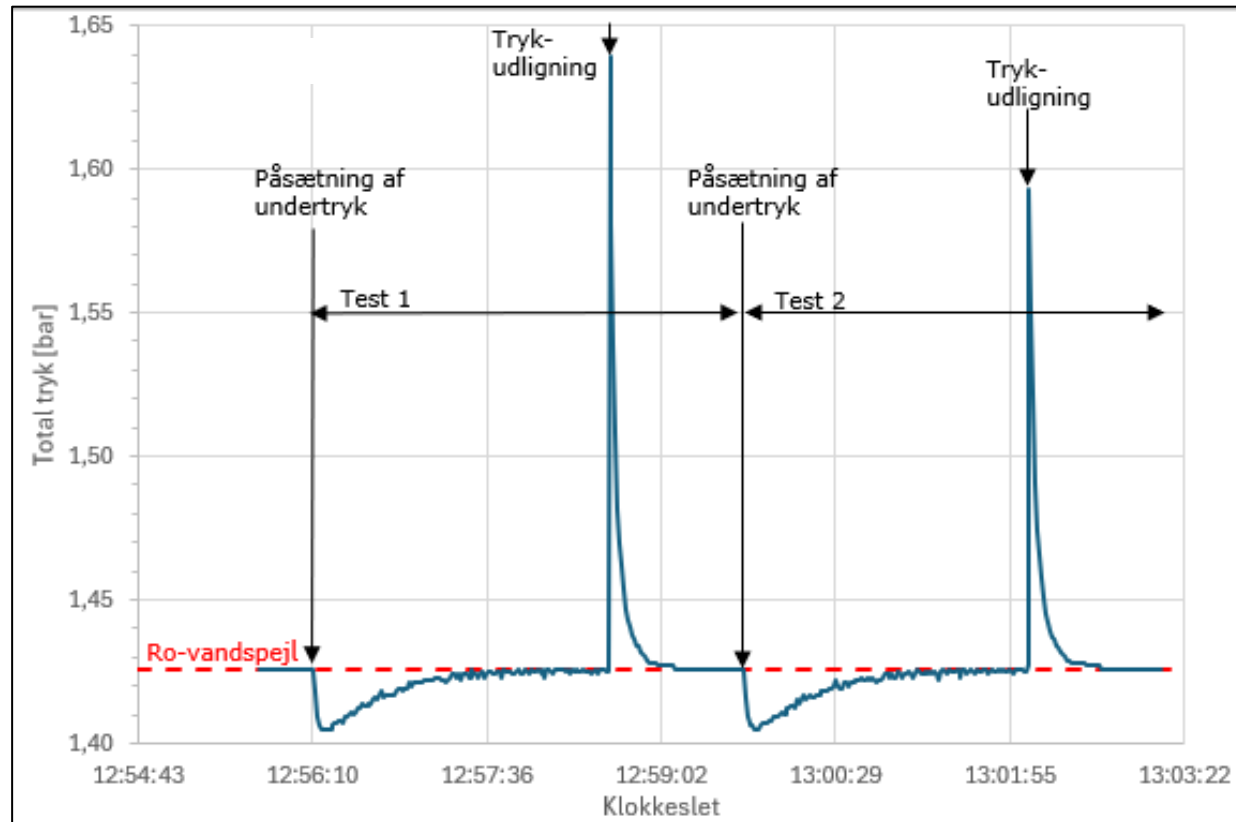
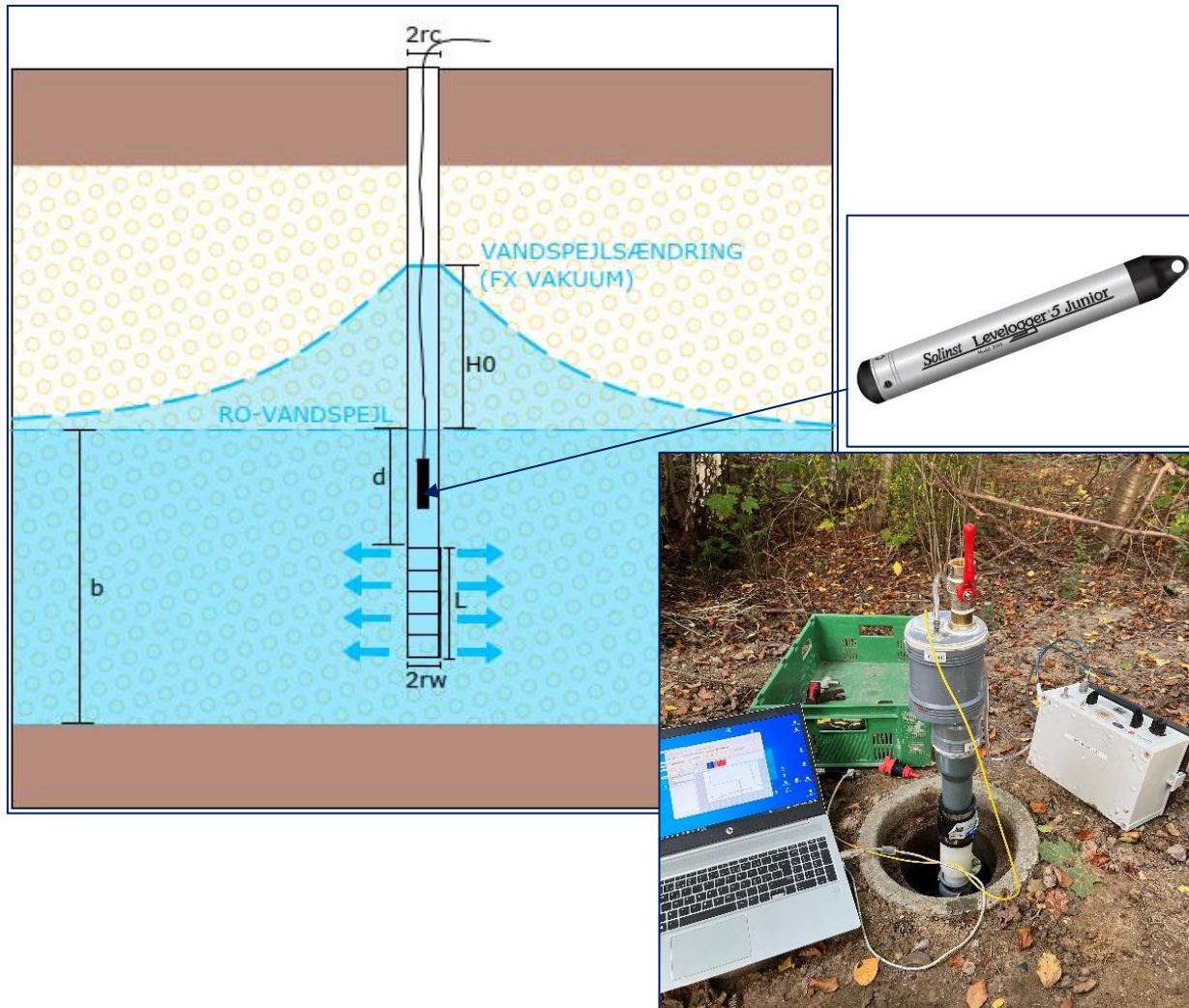
Estimation of Hydraulic Conductivity	cm/s	m/s	m/d	de
Hazen	8,44E-04	8,44E-06	0,73	
Hazen K (cm/s) = d ₁₀ (mm)	1,03E-03	1,03E-05	0,89	
Slichter	2,27E-04	2,27E-06	0,20	
Terzaghi	3,86E-04	3,86E-06	0,33	
Beyer	7,79E-04	7,79E-06	0,67	
Sauerbrei	7,29E-04	7,29E-06	0,63	
Kruger	6,20E-04	6,20E-06	0,54	
Kozeny-Carmen	7,28E-04	7,28E-06	0,63	
Zunker	4,96E-04	4,96E-06	0,43	
Zamarin	6,91E-04	6,91E-06	0,60	
USBR	7,47E-04	7,47E-06	0,65	
Barr	2,87E-04	2,87E-06	0,25	
Alyamani and Sen	1,66E-05	1,66E-07	0,01	
Chapuis	1,97E-04	1,97E-06	0,17	
Krumbein and Monk	1,40E-03	1,40E-05	1,21	
Shepherd	8,02E-03	8,02E-05	6,93	
geometric mean	2,64E-04	2,64E-06	0,23	
arithmetic mean	6,09E-04	6,09E-06	0,53	



Estimation of	m/s	m/d	de
Hazen K (cm/s) = d ₁₀ (mm)	1,38E-02	1,69E-04	14,57
Slichter	6,50E-03	6,50E-05	5,62
Terzaghi	1,15E-02	1,15E-04	9,90
Beyer	1,30E-02	1,30E-04	11,19
Sauerbrei	1,08E-02	1,08E-04	9,35
Kruger	1,40E-02	1,40E-04	12,08
Kozeny-Carmen	2,92E-02	2,92E-04	25,22
Zunker	1,52E-02	1,52E-04	13,17
Zamarin	1,75E-02	1,75E-04	15,11
USBR	4,31E-03	4,31E-05	3,72
Barr	1,03E-02	1,03E-04	8,86
Alyamani and Sen	1,38E-02	1,38E-04	11,96
Chapuis	2,24E-02	2,24E-04	19,35
Krumbein and Monk	8,26E-03	8,26E-05	7,14
Shepherd	1,30E-02	1,30E-04	11,23
geometric mean	1,11E-02	1,11E-04	9,56
arithmetic mean	1,15E-02	1,15E-04	9,90

Slugtest

- 1) Initiere en abrupt vandspejlsændring i et filter (fx ved at påføre vakuum)
- 2) Monitorerer (logge) vandspejlsændringen over tid, mens vandspejlet bevæger sig tilbage til ro



Slugtest

Slug Test Analysis



AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 14 m

Anisotropy Ratio (K_z/K_r): 1

WELL DATA

Initial Displacement: 1.387 m

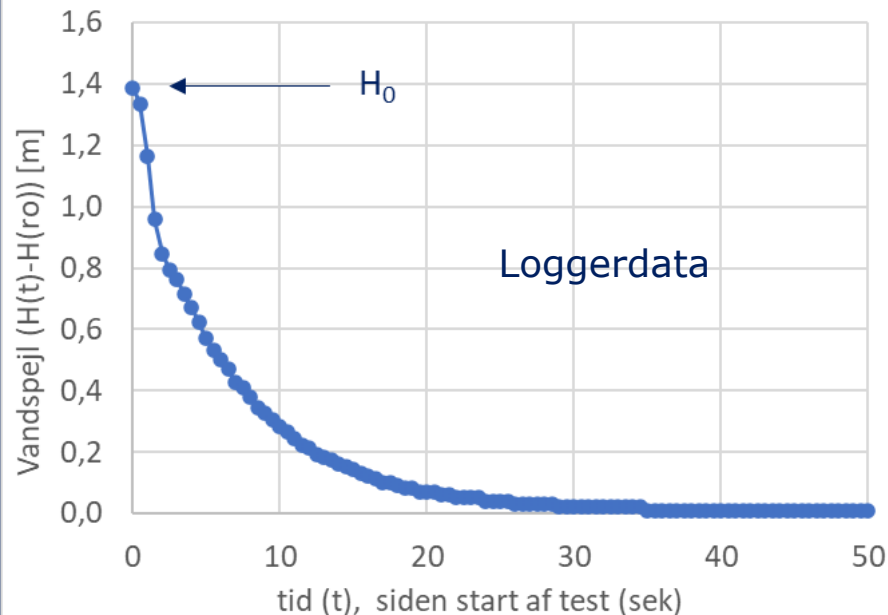
Static Water Column Height: 15 m

Total Well Penetration Depth: 3.9 m

Screen Length: 2 m

Casing Radius: 0.0257 m

Well Radius: 0.11 m



"Simpel" retlinjede løsningsmodeller
(mere avancerede løsningsmodeller findes)

Hvorslev (1951)
for et spændt magasin

$$\ln(H_0) - \ln(H) = \frac{2K_r L t}{r_c^2 \ln\left(\frac{L}{2r_{we}} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_{we}}\right)^2}\right)}$$

$$r_{we} = r_w \sqrt{K_z/K_r} \quad (2)$$

Bouwer & Rice (1976)
for et frit magasin

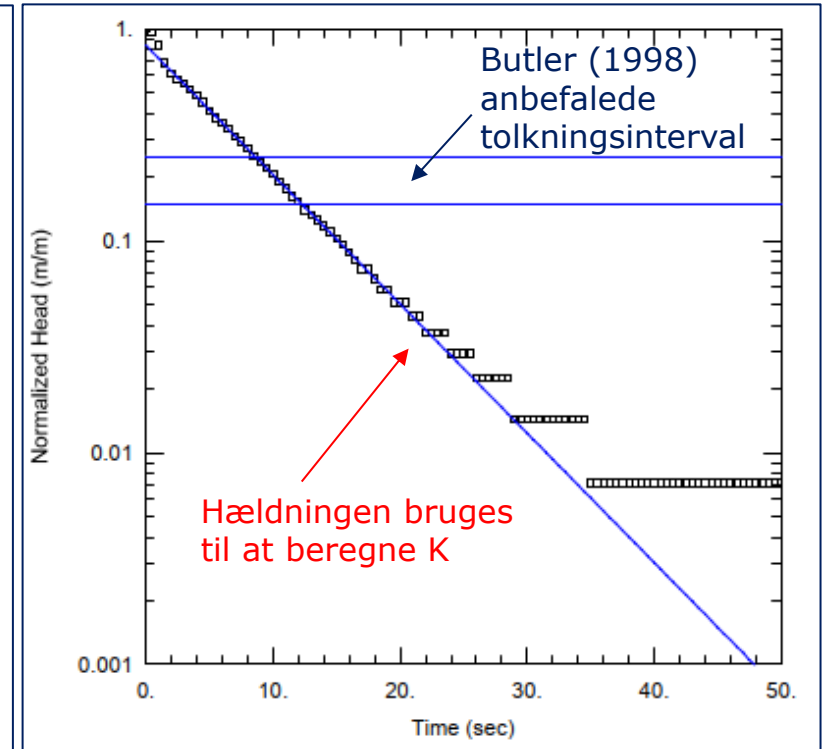
$$\ln(H_0) - \ln(H) = \frac{2K_r L t}{r_{ce}^2 \ln(R_e/r_{we})} \quad (1)$$

$$r_{ce} = \sqrt{(1 - n_e)r_c^2 + n_e r_w^2} \quad (2)$$

$$r_{we} = r_w \sqrt{K_z/K_r} \quad (3)$$

where

- H is displacement at time t [L]
- H_0 is initial displacement at $t = 0$ [L]
- K_r is radial (horizontal) hydraulic conductivity [L/T]
- K_z is vertical hydraulic conductivity [L/T]
- L is screen length [L]
- n_e is effective porosity (specific yield) of the filter pack [dimensionless]
- r_c is nominal casing radius [L]
- r_w is well radius [L]
- R_e is external or effective radius of the test [L]
- t is elapsed time since initiation of the test [T]



SOLUTION

Aquifer Model: Confined

Solution Method: Hvorslev

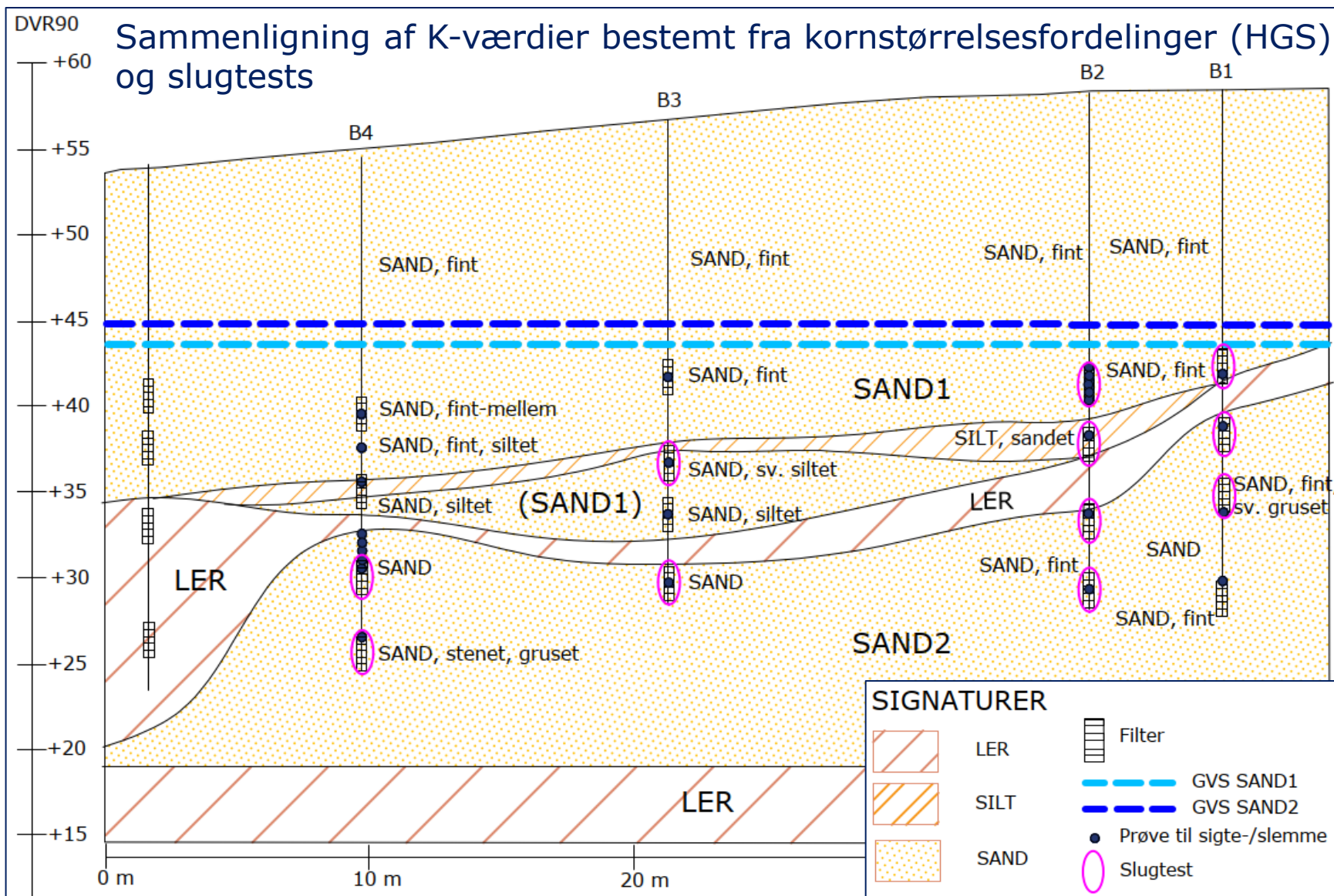
$K = 6.735E-5$ m/sec

$y_0 = 1.16$ m

Assumptions

- ✓ aquifer has infinite areal extent
- ✓ aquifer is homogeneous and of uniform thickness
- ✓ aquifer potentiometric surface is initially horizontal
- ✓ control well is fully or partially penetrating
- ✓ a volume of water, V , is injected or discharged instantaneously from the control well
- ✓ aquifer is confined or unconfined
- ✓ flow is steady

Lokalitet - Sammenlignende studie



Området er generelt præget af en rodet geologi med mange skråtstillede lag af smeltevands-sand, -silt og -ler med små forkastninger og store terrænforskelle.

Boreprofilerne i det undersøgte transekt beskriver fint sand med varierende indhold af silt

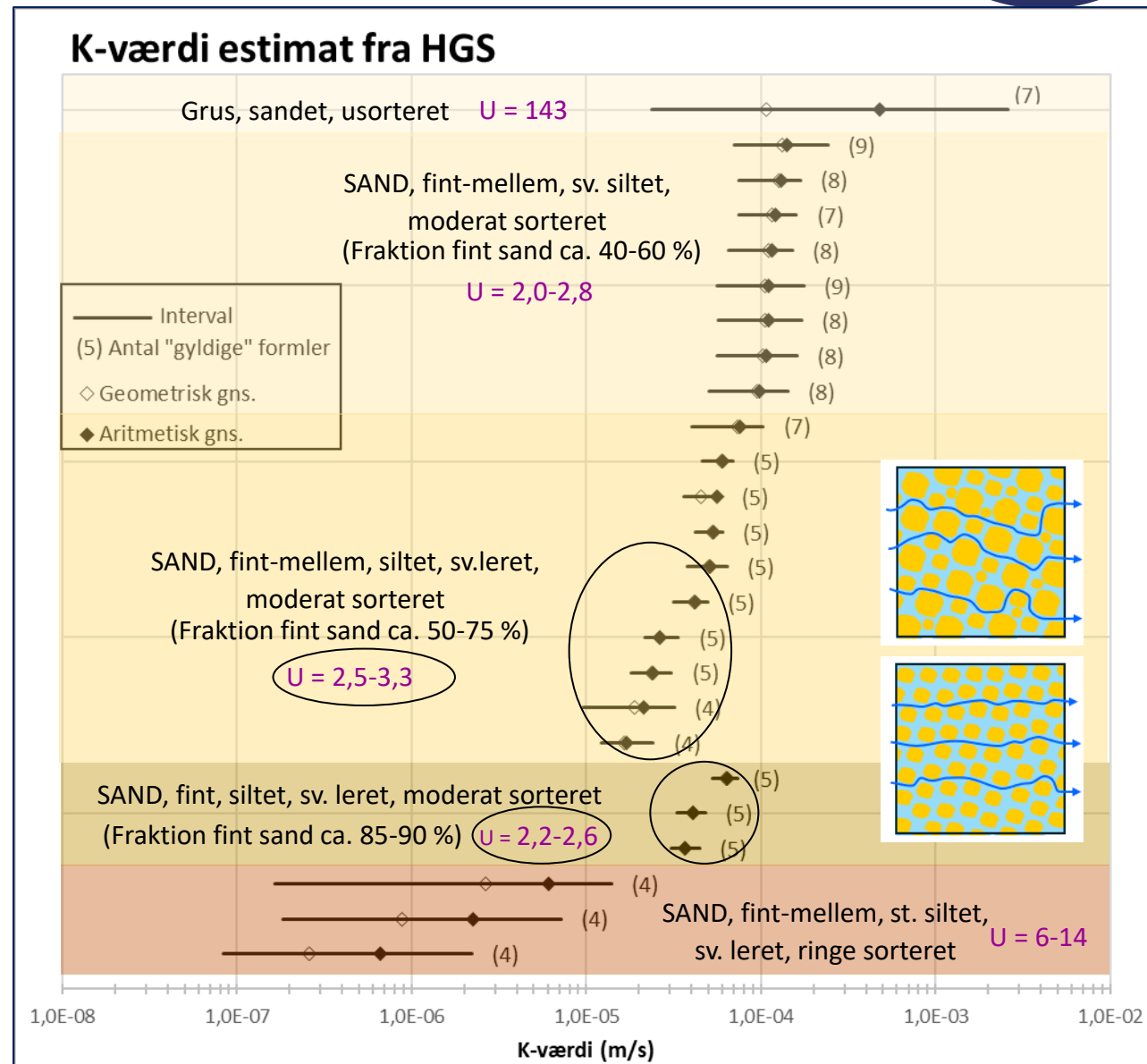
Boringerne er filtersat i 2 hydraulisk adskilte magasiner. Et øvre frit magasin (SAND1) og et nedre spændt magasin (SAND2)

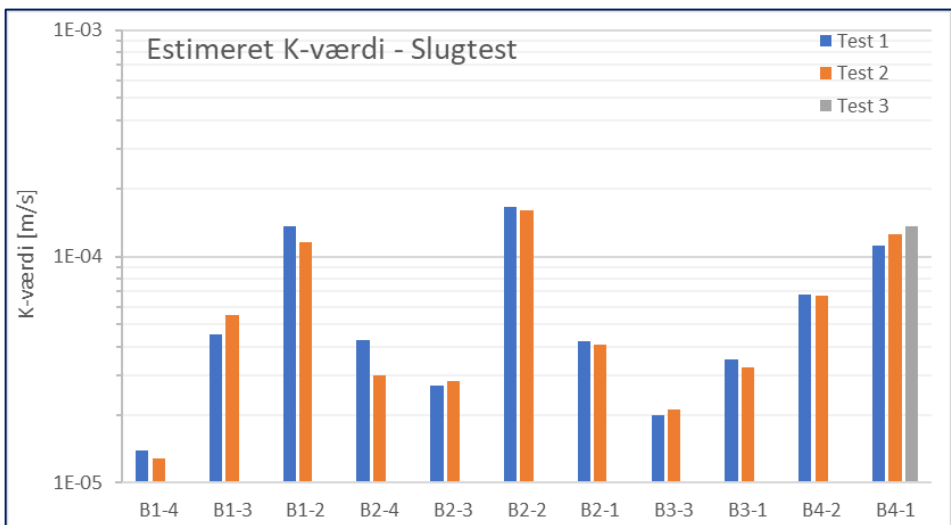
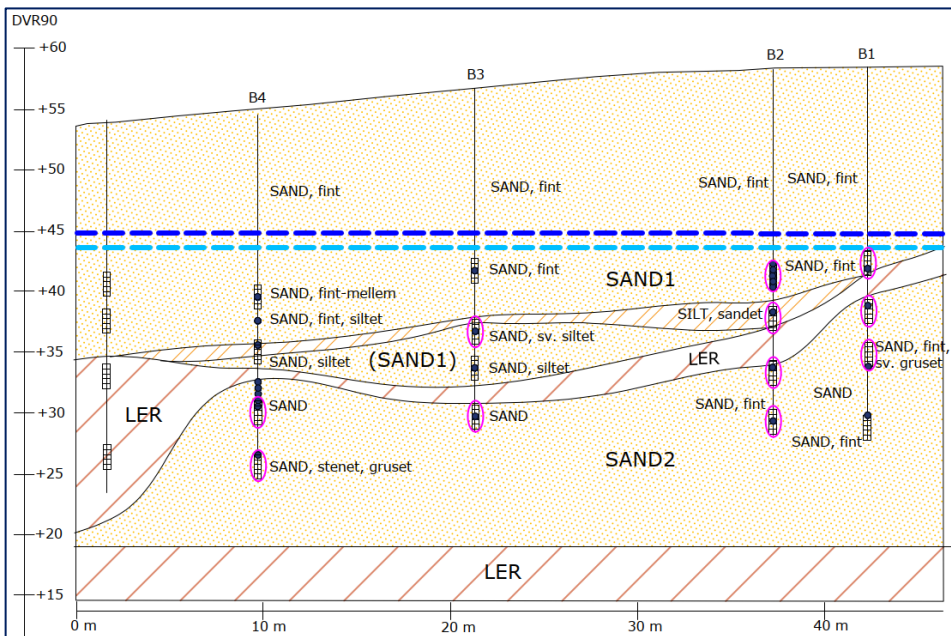
Undersøgelsen omfatter:

- 4 boringer
- 25 Sigte-/slemmeanalyser
- 11 slugtests på 2 m lange filtre

Lokalitet – K-værdi fra kornstørrelsesfordelinger (HGS)

- Sigte-/slemmeanalyserne og resulterende kornstørrelsesfordelinger giver en mere detaljeret beskrivelse og viser større variation end tolket ud fra boreprofil beskrivelsen
- Estimerer af K-værdi der varierer ca. en faktor 10 inden for kategorien SAND, fint-mellem, sv. siltet, moderat sorteret
- Jo mere finkornet/højere indhold af silt og ler, jo færre "gyldige" formler
- Jo mere usorteret (højere U) jo større variation i estimat mellem de forskellige formler og mellem geometrisk og aritmetisk gennemsnit
- En mere enskornet fordeling af fint sand (lavere U) kan have større betydning for et højere K-estimatet end en finkornet sand med højere andel af mellem- og grovkornet sand



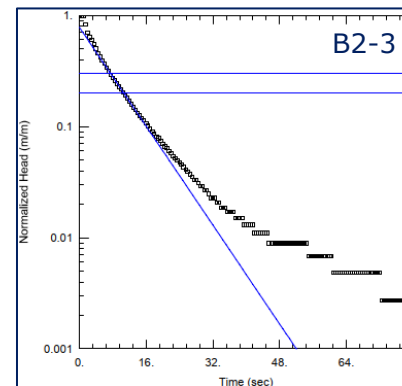
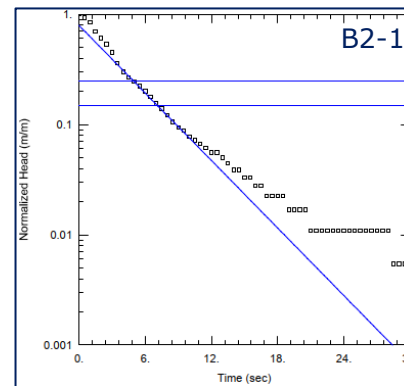
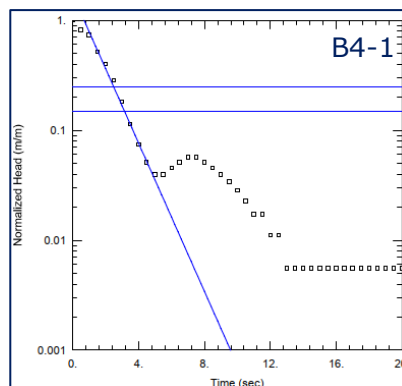
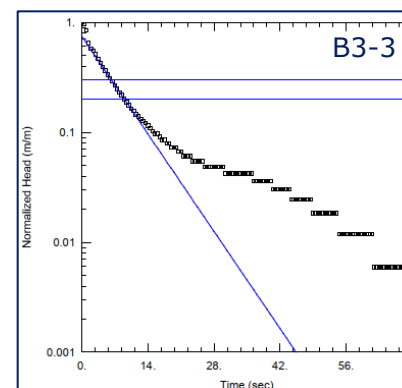
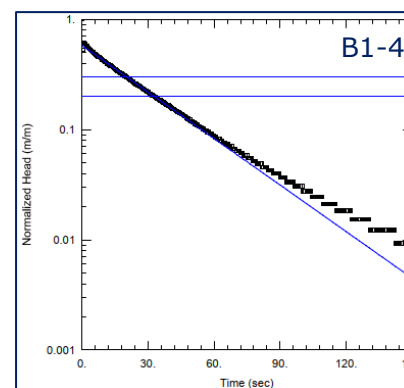
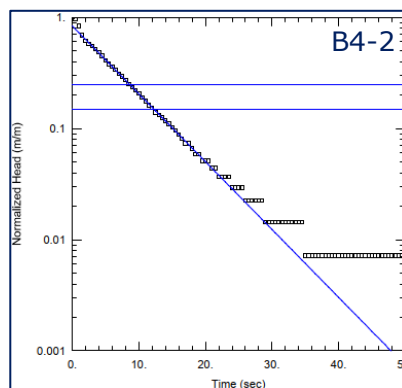


Slugtestprocedure:

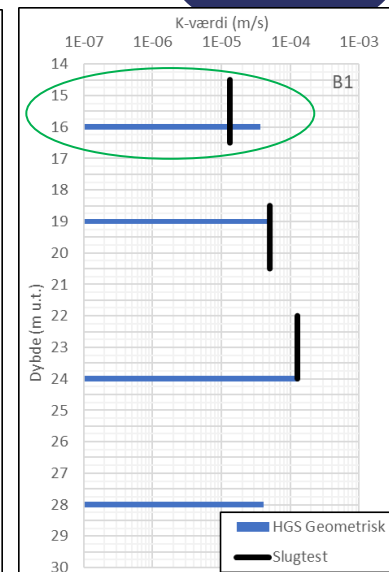
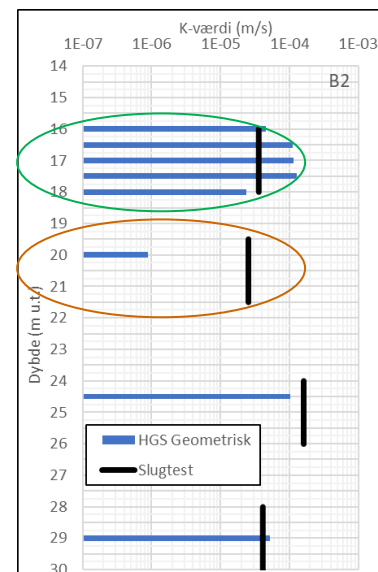
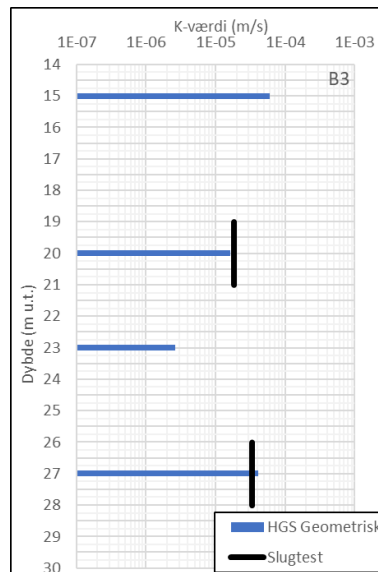
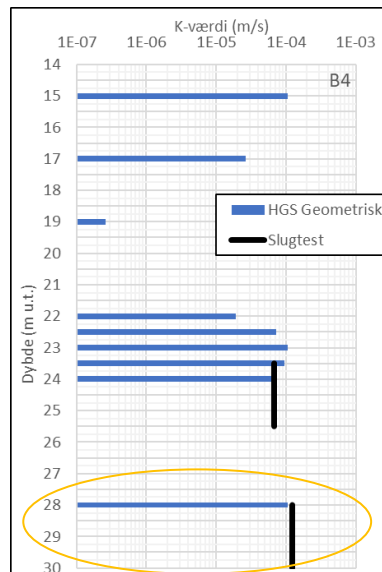
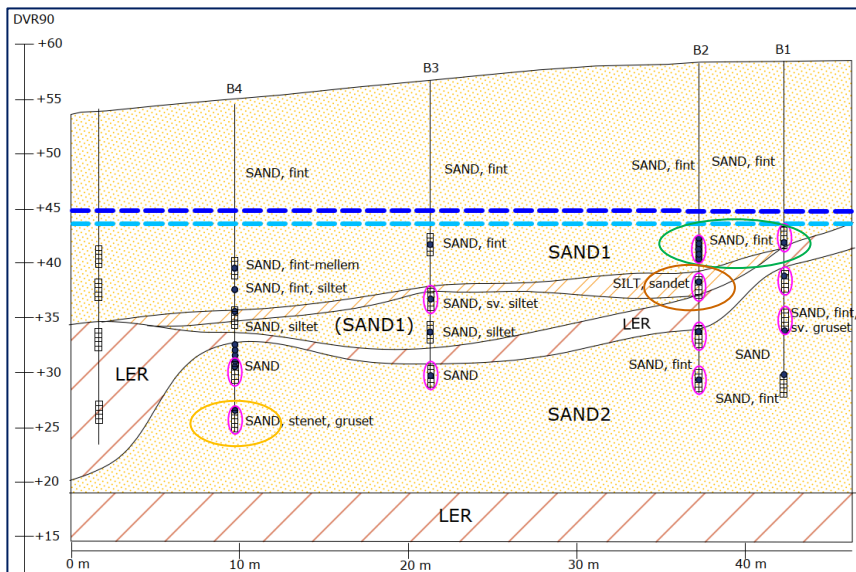
- Vakuum test med ca. 300 mbar undertryk
- Tryktransducer logget med tidsinterval på 0,5 sekunder
- Min. to på hinanden følgende tests i hvert filter

Slugtestanalyse

- Analyseprogram AQTESOLV
- Retlinjede Hvorslev eller Bouwer & Rice løsningsmodeller
 - Filtre i SAND1: Bouwer & Rice's løsningsmodel for et frit magasin
 - Filtre i SAND2: Hvorslev's løsningsmodel for et spændt magasin
- Anisotropifaktor (K_v/K_r) = 1 (isotropt magasin i vertikal og horisontal retning)
- Magasinmægtighed justeret på baggrund af observerede lerlag i den enkelte boring



Lokalitet – Sammenligning K-værdi fra HGS og slugtest

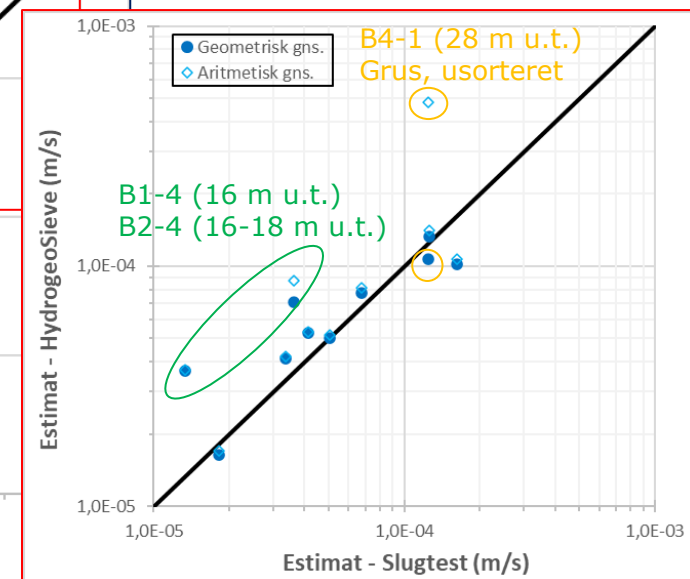
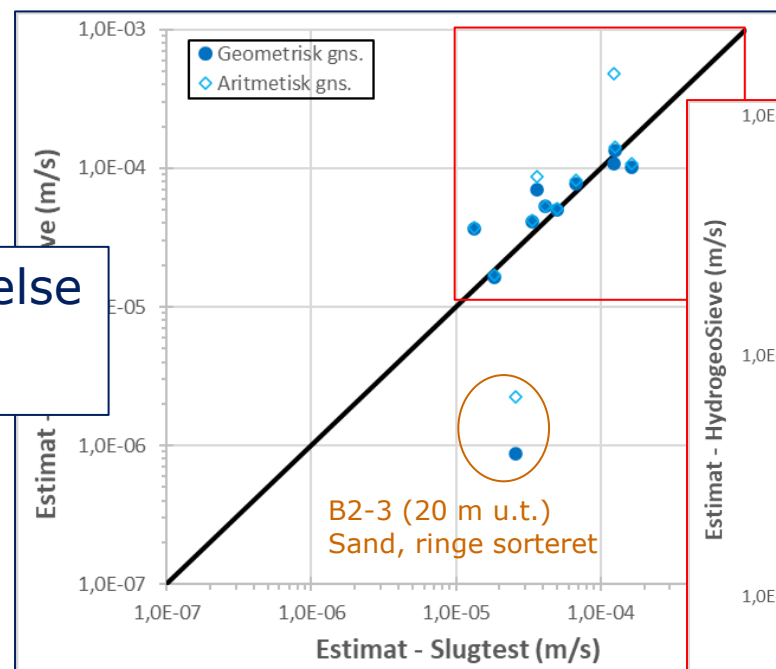


Fra filterinterval tilhørende	HGS				Slugtest		
	Prøvedybde m u.t.	Uensformig- hedstal (U)	K-værdi (m/s)		Filter top m u.t.	Filter bund m u.t.	K-værdi (m/s) Gennemsnit
			Geo gns.	Arit gns.			
B1-4	16	2,6	3,67E-05	3,70E-05	14,5	16,5	1,34E-05
B1-3	19	3,0	5,04E-05	5,15E-05	18,5	20,5	5,03E-05
B1-2	24	2,0	1,33E-04	1,41E-04	22	24	1,26E-04
B2-4	16	2,7	4,52E-05	4,58E-05			

Overordnet **RIGTIG GOD** overensstemmelse

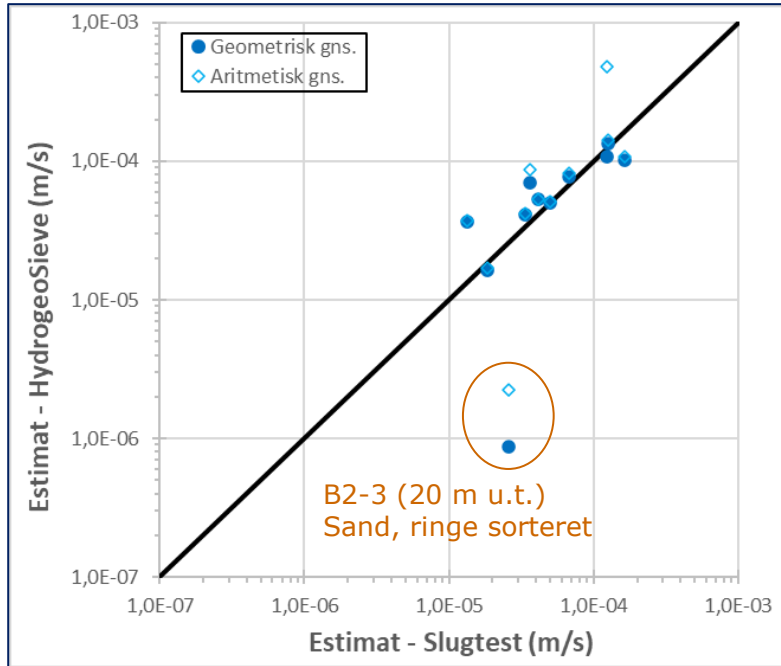
Men vi dykker lige lidt mere ned i de få "afvigere"

B2-2	24,5	2,3	1,02E-04	1,07E-04	24	26	1,63E-04
B2-1	29	2,5	5,29E-05	5,33E-05	28	30	4,15E-05
B3-3	20	3,6	1,64E-05	1,71E-05	19	21	1,83E-05
B3-1	27	2,9	4,13E-05	4,19E-05	26	28	3,37E-05
B4-2	23,5	2,6	9,47E-05	9,87E-05	23,5	25,5	6,75E-05
B4-2	24	2,2	6,35E-05	6,40E-05			
B4-1	28	143	1,07E-04	4,80E-04	28	30	1,24E-04



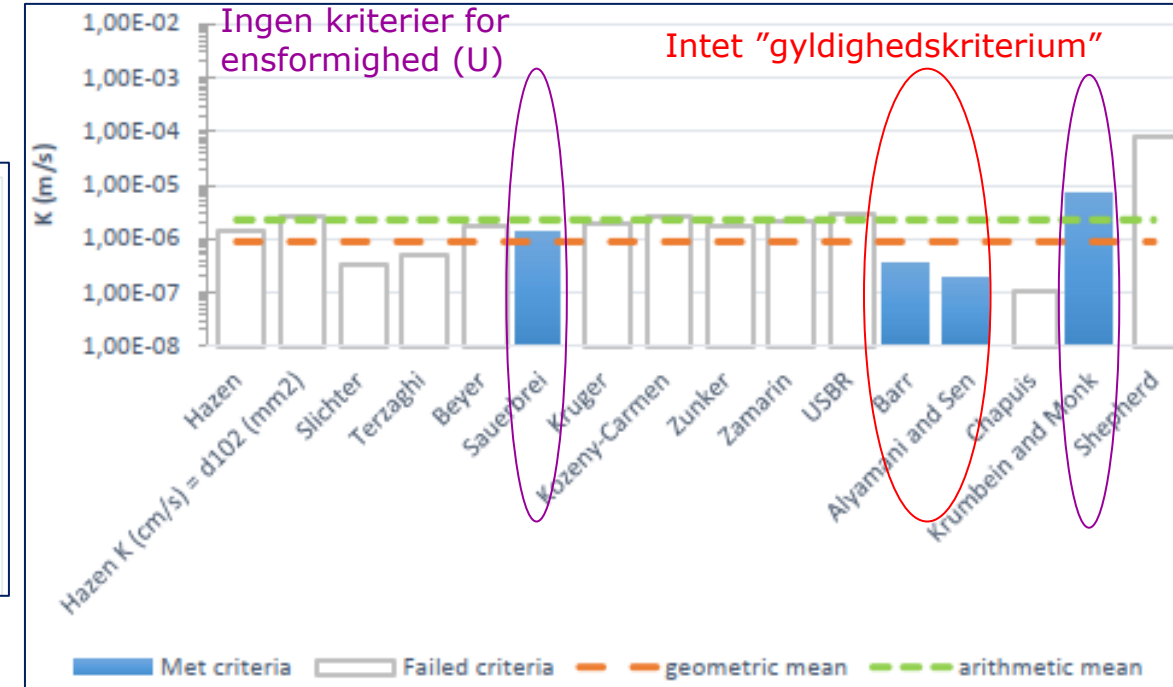
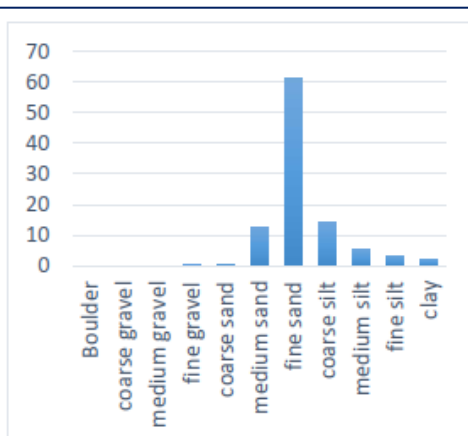
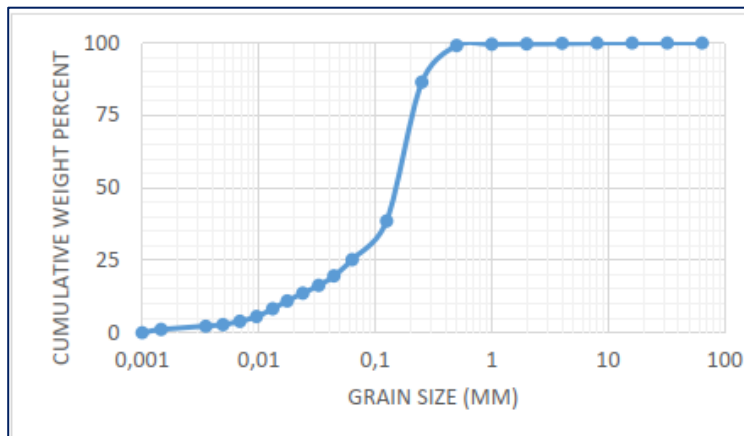
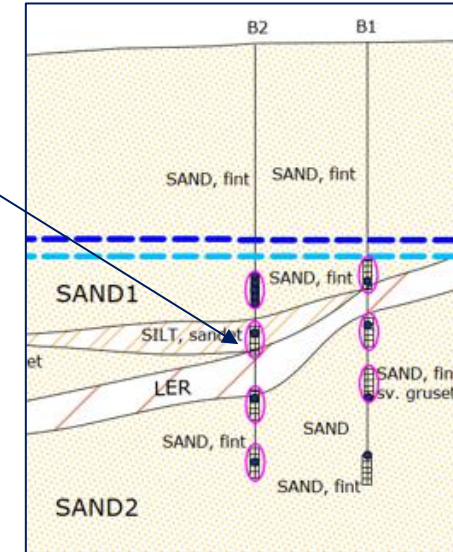
Lokalitet – Sammenligning K-værdi fra HGS og slugtest

Overordnet RIGTIG GOD overensstemmelse

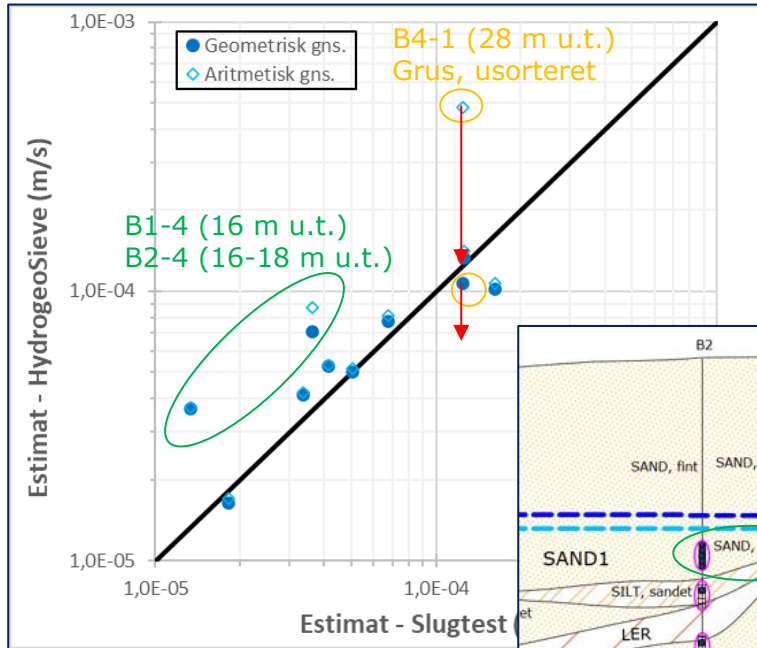


Slugtest > 10*HGS

- Skalaeffekt, HGS prøven repræsenterer dårligt filteret som helhed
- HGS "uegnet" til ringe sorterede prøver med højt indhold af finkornet materiale (underestimerer K)
 - $U=11$
 - "højt" indhold af finkornet materiale, ler (2,2%) og silt (23%).
 - Få formler (4) som enten ikke har gyldighedskriterium eller ikke krav til U eller indhold af ler



Overordnet RIGTIG GOD overensstemmelse



HGS aritmetisk gennemsnit >> Slugtest, mens HGS geometrisk gennemsnit = slugtest

- Skalaeffekt
- Slugtest viser tegn på delvist underdæmpet respons/flere flowregimer
 - Hvorslev er ikke optimal løsningsmodel

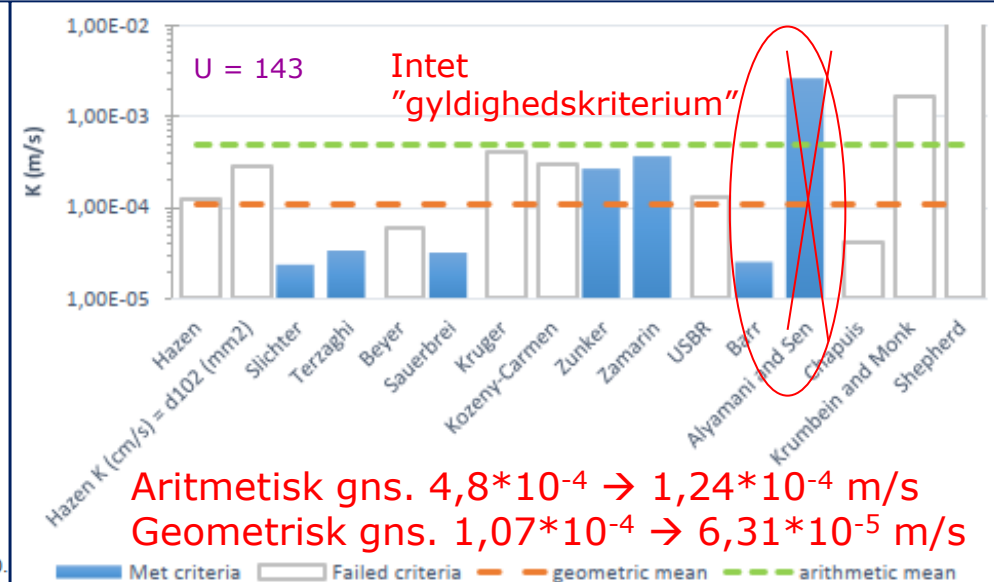
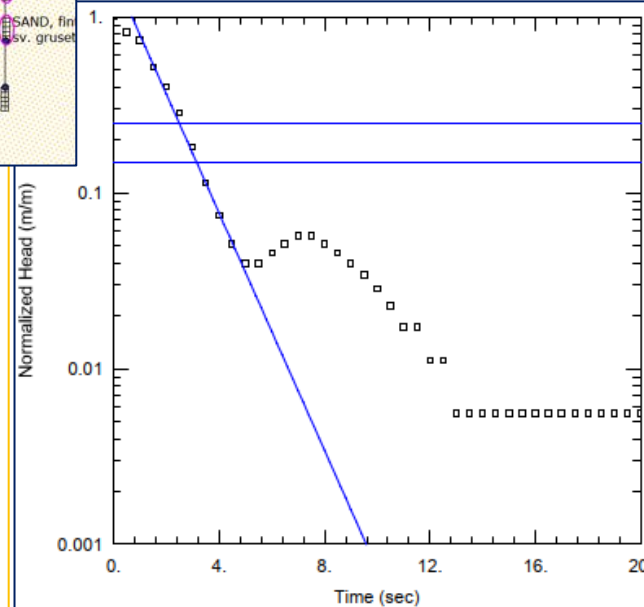
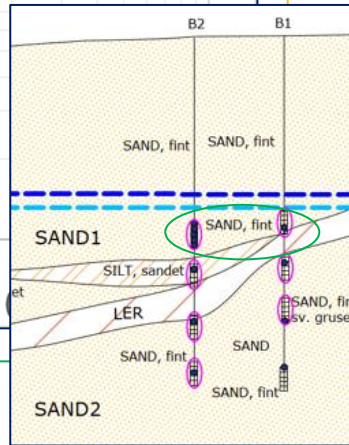
HGS "outlier" på formel uden gyldighedskriterium har stor betydning for det beregnede aritmetiske gennemsnit

Geometrisk gennemsnit mindre følsom overfor outliers i den høje ende end aritmetisk gennemsnit

HGS ca. 2-3*Slugtest

God/acceptabel match, men større forskel end for de andre prøver

Fællestræk er at de to filtre, er at de er placeret med top lige omkring vandspejl → lidt større usikkerhed på tolkning af slugtests.



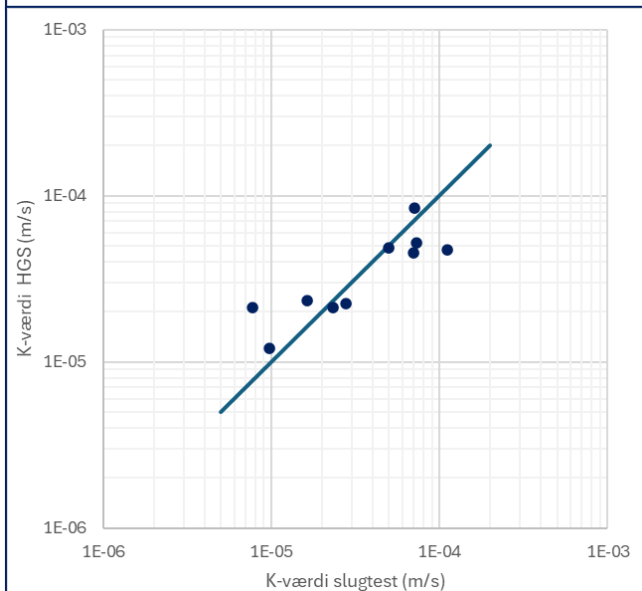
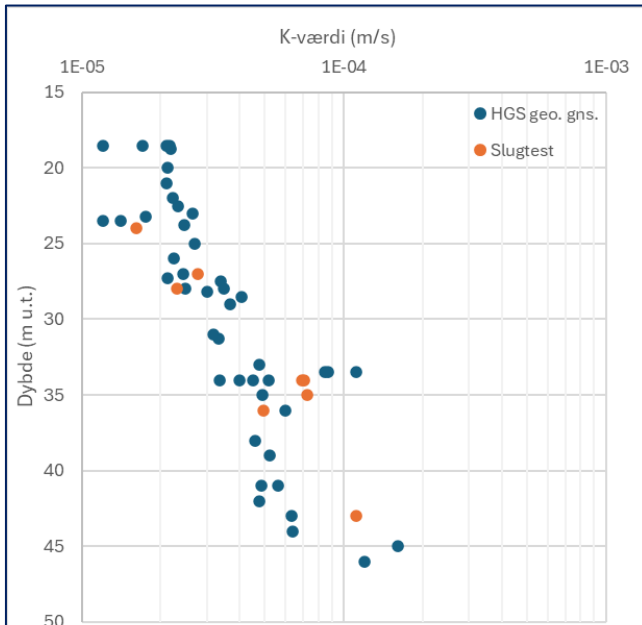
Aritmetisk gns. $4,8 \cdot 10^{-4} \rightarrow 1,24 \cdot 10^{-4}$ m/s
Geometrisk gns. $1,07 \cdot 10^{-4} \rightarrow 6,31 \cdot 10^{-5}$ m/s

- Hydraulisk ledningsevne (K-værdi) er en nøgleparameter til fluxberegninger og en robust risikovurdering af grundvandstruende forureninger
- K-værdi kan spænde over flere størrelsesordener i typiske danske kvartære sand- og grusmagasiner
- Der er flere eksempler på god overensstemmelse mellem K-værdi estimeret baseret på kornstørrelsesfordelinger (HGS) og slugtestanalyser for velsorterede til moderat sorterede kvartære sand- og grusmagasiner med et lavt indhold af ler
- K-værdier baseret på analyse af kornstørrelsesfordelinger i HGS vurderes i mange tilfælde velegnet til anvendelse i fluxestimer og risikovurderinger
 - Resultatet ofte lige så robuste som ved anvendelse af K-værdier baseret på slugtestanalyser, og mere robuste end estimeret baseret på litteraturværdier af K
 - Værdifuldt redskab til en indledende screening eller en mere detaljeret profilering
 - Ofte billigere end slugtests (hvis man har husket at udtage jordprøver i forbindelse med borearbejdet)
 - Ingen ekstra feltkampagne eller avanceret prøvetagningsudstyr
 - Mindre specialiseret og tidskrævende tolkning
 - Gevinst i form af mere detaljeret geologisk beskrivelse til konceptuel model

- Anbefalinger og opmærksomhedspunkter ved HGS-analysen
 - Brug geometrisk frem for aritmetisk gennemsnit, da det geometriske gennemsnit er mindre følsom overfor outliers (i den høje ende)
 - Genbesøg resultater og formlernes gyldighedskriterier med et kritisk blik, hvis der er stor forskel mellem aritmetisk og geometrisk gennemsnit
 - Genberegnet evt. gennemsnit manuelt uden outliers.
- Der vurderes at være risiko for underestimering af K-værdi for magasiner bestående af ringe og usorteret sand/grus med et højt indhold af finkornet materiale, hvilket potentielt kan resultere i et negativt bias i fluxestimat
 - Anvend/suppler med K-værdier bestemt ved andre metoder, fx slugtest

Opsamling og pointer – Kornstørrelsesfordeling vs. slugtest

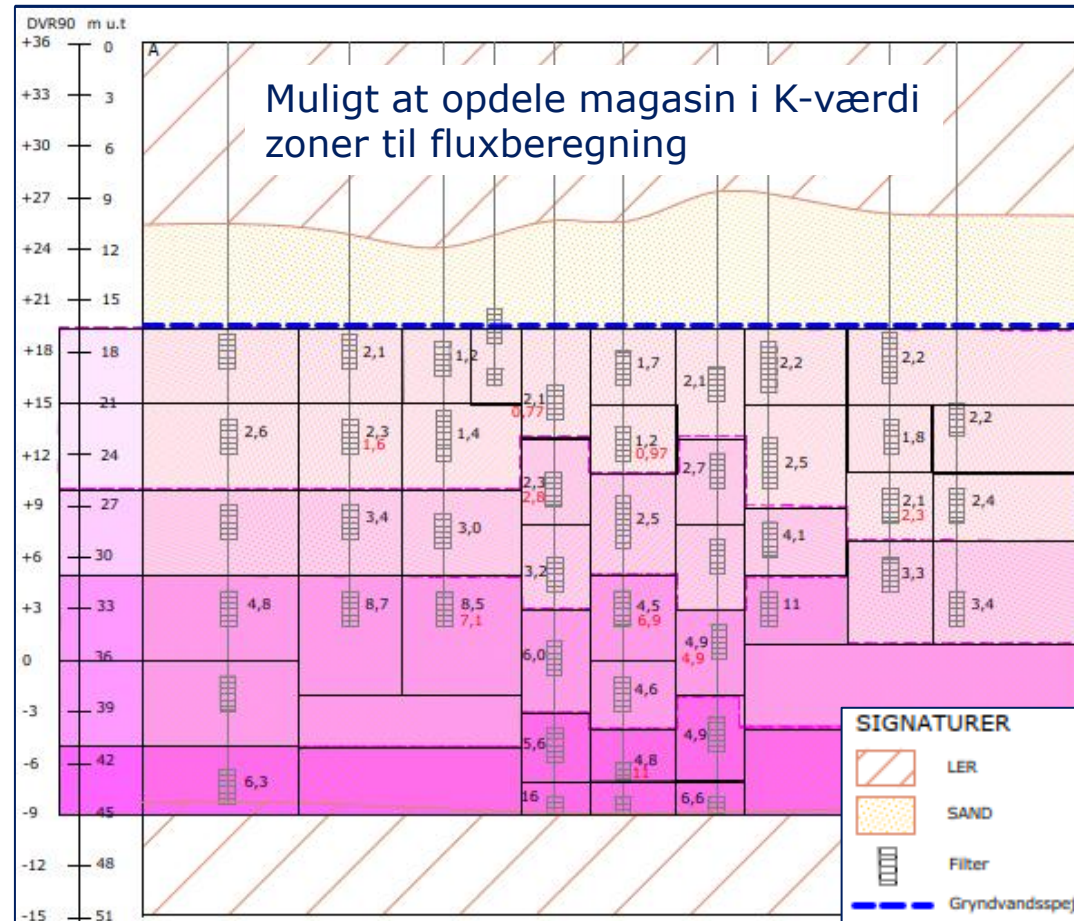
	Kornstørrelsesfordeling (HGS)	Slugtests
Pris	"Billig" Hvis prøven er udtaget i forbindelse med borearbejde	"Dyrere" - Separat feltkampagne - Dyrere udstyr - Mere avanceret og tidskrævende databehandling og tolkning
Skala	Meget lille (punktprøve)	Større (repræsentere som minimum filterstrækningen), men ofte stadig meget mindre end magasinets heterogenitetsskala
Prøvetype	Testen laves på en forstyrret prøve, der kan være sket separation/sortering af prøvemateriale ved prøvetagning (især hvis usorteret og visse boremetoder)	Testen udføres på (delvist) uforstyrret magasinmateriale
Planlægning	Udtagning af prøve skal indtænkes i forbindelse med borearbejdet	Kan udføres på allerede etablerede filtersatte boringer
Magasin-materialer	Mindre velegnet til lavpermeable (lerede) og usorterede aflejringer Ikke velegnet til bjergarter/kalk	Velegnet til de fleste magasin typer
Generelt	Både prøvetagningen/udførelsen af kornstørrelsesfordelinger og slugtests samt tolkning af data er behæftet med en række forskellige usikkerheder og antagelser, der ikke altid er opfyldte. Det er derfor heller ikke entydigt, hvilken af de to metoder der giver det "mest rigtige" estimat af K-værdien. Generelt skal man altid forholde sig kritisk til usikkerheder og ikke-ideelle forhold både på kornstørrelsesfordelingerne og slugtestresultaterne og tolkningen af disse.	



"Homogent" sandmagasin (smeltevandssand)

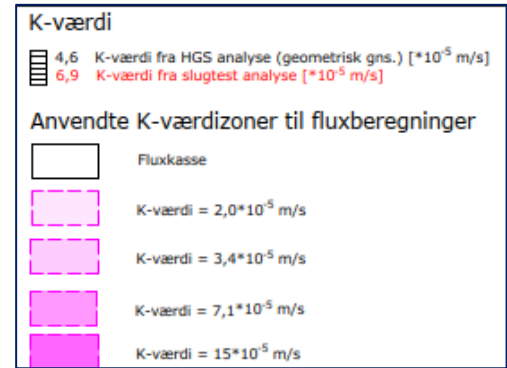
Relativt sorteret fint siltet sand

- Fint sand og groft silt udgør > 93 %
(undtagen lige over leren, hvor der er en højere fraktion mellem og grovkornet sand)
- U= 2-3



Undersøgelsen omfatter:

- > 10 boringer
- 45 Sigte-/slemmeanalyser (1 prøve for hvert filterniveau)
- 10 slugtests på udvalgte filtre fra forskellige boringer og i forskellige dyber.



TAK FOR OPMÆRKSOMHEDEN