

Hydraulisk konduktivitet i grovkorniga jordmaterial

Bestämning för jordmaterial som kan ingå i fyllningsdammar

Johan Lagerlund

13 april 2022

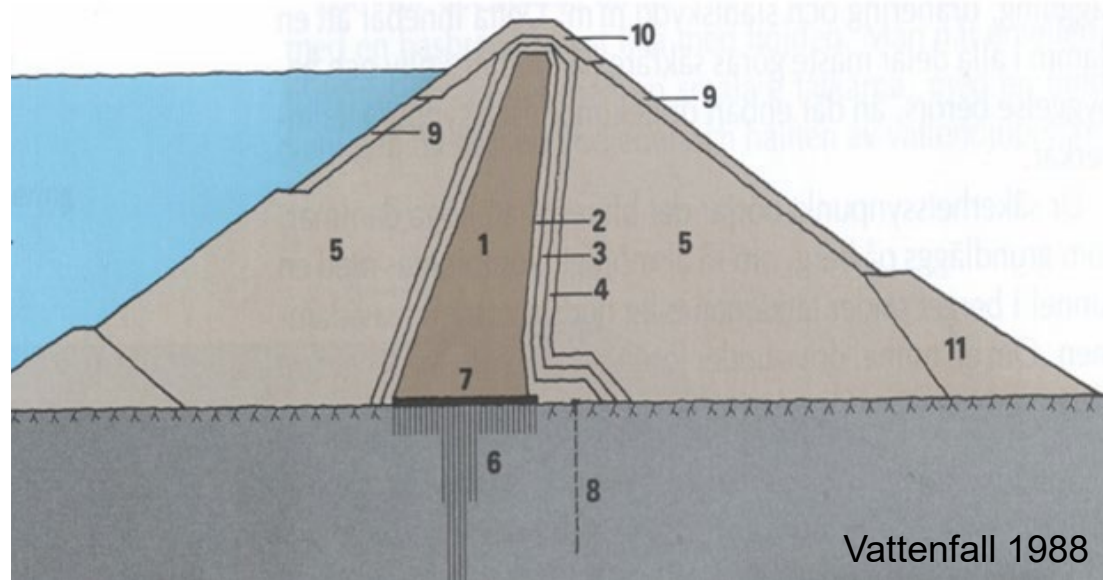
Innehåll

- Bakgrund
- Hydraulisk konduktivitet
- Testutrustning
- Resultat
- Diskussion
- Slutsatser
- Fortsättning



Bakgrund - Fyllningsdammen

- Vart hittar vi zoner med grövre jordmaterial i en fyllningsdamm?
- Filter (2, 3, 4)
- Stödfyllning (5)
- Dammtå (11)



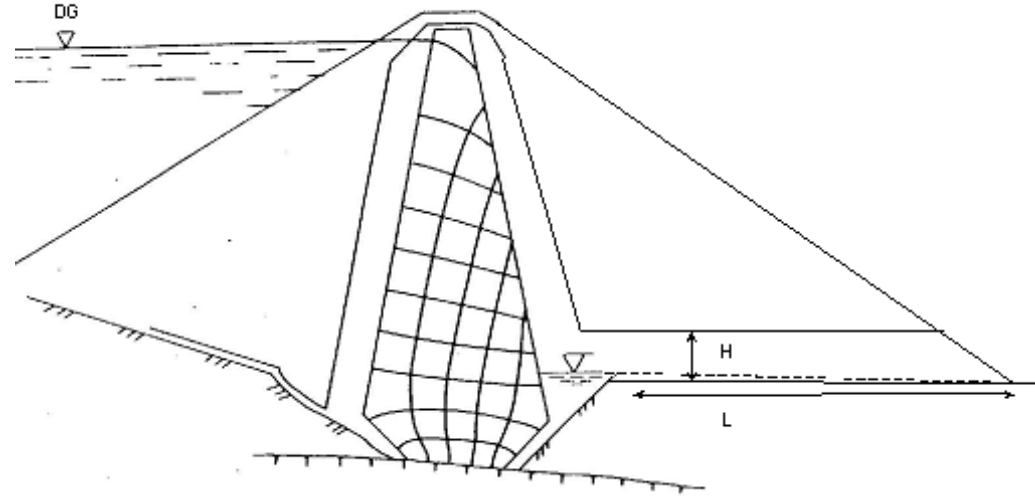
Bakgrund - Dränagebehov

- Dränagekapacitet viktigt för grövre materialzoner i en fyllningsdamm!

$$K = \frac{Q}{ixH}$$

$$\text{Sätt } i = \frac{H}{L}$$

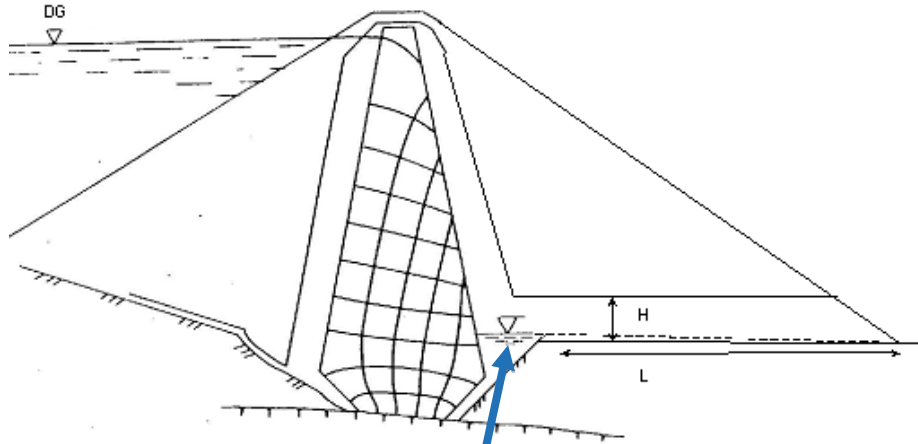
$$\text{Om } H \text{ söks } \rightarrow H = \sqrt{\frac{QxL}{K}}$$



RIDAS 2020

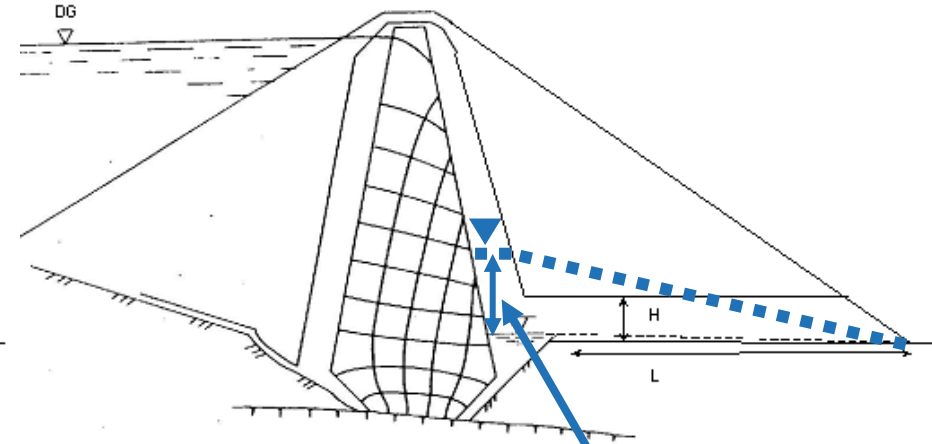
Där K = hydraulisk konduktivitet på materialet (m/s), Q = flödet (m^3/s), i = hydraulisk gradient (H/L), H = dränagelagrets tjocklek (m) och L = dränagelagrets längd (m)

Bakgrund - Dränagebehov



$$H = \sqrt{\frac{QxL}{K}}$$

Men om Q ökar eller K minskar med tiden?



$$H = \sqrt{\frac{QxL}{K}}$$

Bakgrund - Dränagebehov

Vi måste alltså känna till den hydrauliska konduktiviteten för att på ett säkert sätt dimensionera våra fyllningsdammar så att de klarar av att dräneras!

... Nu ska vi bara bestämma den hydrauliska konduktiviteten för dränerande (grovkorniga) material.

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

Ett mått på hur "enkelt" vatten kan passera genom ett jordmaterial. Uttrycket "enkelt" kan vi tänka som tryckförluster

Jordfraktion	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Fingrus	$10^{-1} - 10^{-2}$
Grovsand	$10^{-2} - 10^{-4}$
Mellansand	$10^{-3} - 10^{-5}$
Grovsilt	$10^{-5} - 10^{-7}$
Mellansilt – finsilt	$10^{-6} - 10^{-8}$
Morän	$10^{-6} - 10^{-9}$
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-11}$
Ler	$< 10^{-9}$

- Låg hydraulisk konduktivitet = höga tryckförluster.
- Hög hydraulisk konduktivitet = låga tryckförluster.

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

Hydraulisk konduktivitet är **INTE** samma sak som permeabilitet!

- Permeabilitet = materialparameter. Enhet Darcy. $1 \text{ Darcy} = 9,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
- Hyd.Kond. beskriver hur en fluid tar sig genom materialet vid ett givet flöde och gradient. Enhet m/s.

Permeabilitet och Hyd.Kond hänger såklart ihop men är **INTE SAMMA SAK!**

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

Vad påverkar storleken på den hydrauliska konduktiviteten?

1. Hydraulisk gradient
2. Kornfördelning
3. Kompaktering av jord
4. Flödesfall

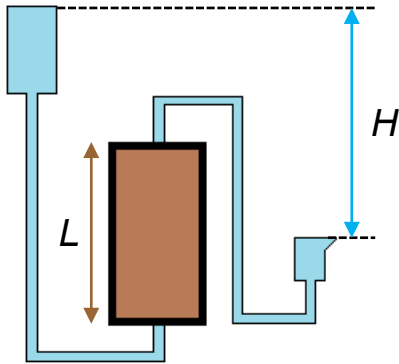
Låt oss beta av dessa fyra faktorer en och en...

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

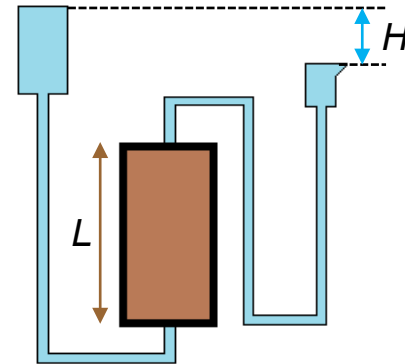
1. *Hydraulisk gradient – Den drivande kraften bakom vattnets rörelse*

↓
Darcys lag → $Q = KiA$

Gradient betecknas i och är kvoten av tryckhöjd (H) på fluid dividerat med längden (L) på den zon fluiden passerar genom



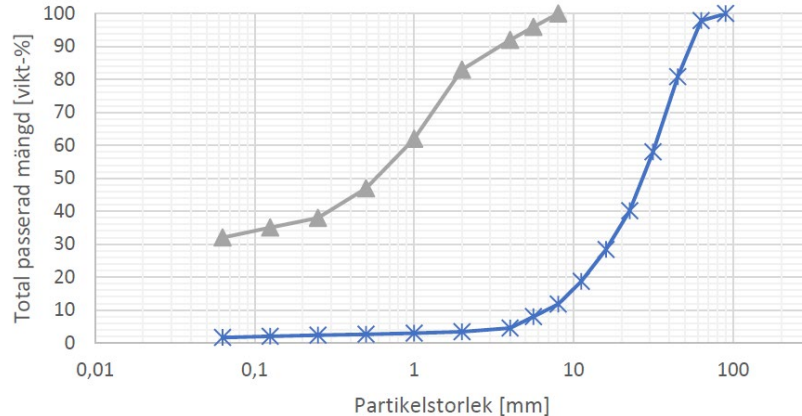
$H/L = \text{högre}$
Högre flöden
Större belastningar på jord



$H/L = \text{lägre}$
Lägre flöden
Lägre belastningar på jord

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

2. Kornfördelning – påverkar direkt permeabilitet och indirekt hydraulisk konduktivitet



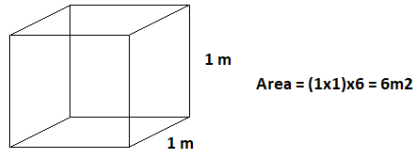
Grå kurva – Högre andel fina jordpartiklar, permeabilitet sjunker

Blå kurva – Högre andel grova jordpartiklar, permeabilitet ökar

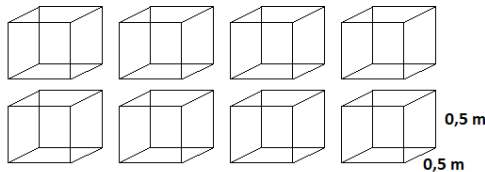
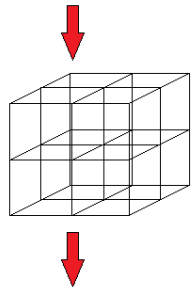
Men varför?

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

2. Kornfördelning – påverkar direkt permeabilitet och indirekt hydraulisk konduktivitet



Tankeexperiment – Tänk en sten, perfekt kub på 1m³. Låt oss dela ner den!



$$\text{Area} = (0,5 \times 0,5) \times 6 \times 8 = 12 \text{m}^2$$

	Halvering [nr]	Sida [m]	Sida [mm]	Area [m ²]
Sten	→ 1	1	1000	6
	2	0,5	500	12
	3	0,25	250	24
	4	0,125	125	48
Grus	→ 5	0,0625	62,5	96
	6	0,03125	31,25	192
	7	0,015625	15,625	384
	8	0,007813	7,8125	768
	9	0,003906	3,90625	1536
	10	0,001953	1,953125	3072
	11	0,000977	0,9765625	6144
	12	0,000488	0,48828125	12288
Sand	→ 13	0,000244	0,244140625	24576
	14	0,000122	0,122070313	49152
	15	6,1E-05	0,061035156	98304
	16	3,05E-05	0,030517578	196608
	17	1,53E-05	0,015258789	393216
	18	7,63E-06	0,007629395	786432
Silt	→ 19	3,81E-06	0,003814697	1572864
	20	1,91E-06	0,001907349	3145728
Lera	→			

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

2. Kornfördelning – påverkar direkt permeabilitet och indirekt hydraulisk konduktivitet

- Ett block med sida 1000mm har area på 6m²
- Samma block, neddelat till sida 0,002mm har area på 3,14km²
- Passerande fluid måste röra sig över större ytor/trängre passager
- Större ytor = ökade trycksänkningar på passerande fluid
- Ökade trycksänkningar = "svårare" för fluiden att strömma genom

	Halvering [nr]	Sida [mm]	Area [m2]
Sten →	1	1000	6
	2	500	12
	3	250	24
Grus →	4	125	48
	5	62,5	96
	6	31,25	192
	7	15,625	384
	8	7,8125	768
Sand →	9	3,90625	1536
	10	1,953125	3072
	11	0,9765625	6144
	12	0,48828125	12288
	13	0,244140625	24576
Silt →	14	0,122070313	49152
	15	0,061035156	98304
	16	0,030517578	196608
	17	0,015258789	393216
	18	0,007629395	786432
Lera →	19	0,003814697	1572864
	20	0,001907349	3145728

Hydraulisk konduktivitet sjunker alltså med ökad mängd finmaterial!!

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

3. Kompaktering – påverkar direkt permeabilitet och indirekt hydraulisk konduktivitet

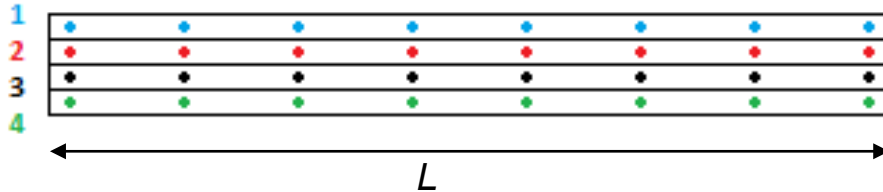
Packning minskar volymen porer i jorden vari fluiden transporteras

Detta leder till minskad permeabilitet och därmed minskad hydraulisk konduktivitet

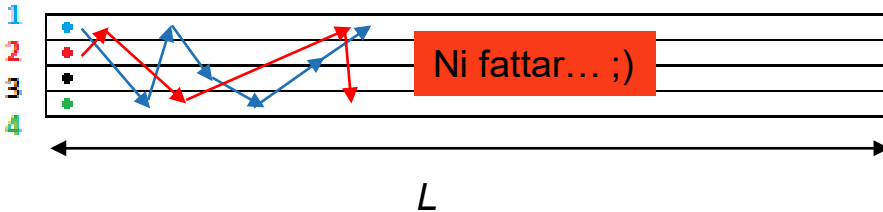
Material	Mätning	Flöde [L/min]	Gradient [m/m]	Temp.korr. hyd.kond. [m/s]	
Top Secret material opackat Porositet = 0,36	A1	3,5	0,06	1,46E-03	↑ Opackat ↓
	A2	5,5	0,13	1,02E-03	
	A3	7,8	0,14	1,36E-03	
	A4	9,5	0,17	1,45E-03	
	A5	8,3	0,19	1,10E-03	
Top secret material packat Porositet = 0,18	B1	0,017	1,55	2,51E-07	↑ Samma jord fast packad ↓
	B2	0,010	0,86	2,69E-07	
	B3	0,019	1,47	2,96E-07	
Top secret material packat Porositet = 0,18	C1	0,004	0,43	2,55E-07	
	C2	0,009	0,84	2,59E-07	
	C3	0,015	1,51	2,49E-07	
	C4	0,018	1,52	2,94E-07	
	C5	0,010	0,87	2,95E-07	

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

4. Flödesfall – Darcy gäller endast för laminära flöden, turbulens ställer till det!



- Laminärt – Flödet sker i lameller
- Fluiden rör sig i en riktning
- Partikeln flödar i en given längd (L) genom jorden



- Turbulens – Flödet sker hursomhelst
- Fluiden rör sig kors och tvärs
- Partikelns längd över vilken den flödar kan bli mycket längre än längden (L) genom jorden

Alltså blir flödesväg per fluidpartikel mycket längre genom en jord vid turbulens

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

4. Flödesfall – Darcy gäller endast för laminära flöden, turbulens ställer till det!

- Då flödesväg blir längre för varje fluidpartikel passerar den fler ytor i jorden än vid laminärt flöde
- Detta innebär större tryckförluster vid provningen och att flöde (Q) stryps
- Högre tryckförluster för en fluid leder till lägre hydraulisk konduktivitet
- Eftersom varje fluidpartikels väg inte kan kartläggas vid turbulens är det omöjligt att kvantifiera turbulensinducerade tryckförluster
- Resultatet blir att den hydrauliska konduktiviteten upplevs som lägre vid turbulenta flöden än vid laminära

$$Q = KiA \text{ där } i = \frac{H}{L}$$
$$Q = \frac{KxHxA}{L}$$

Slutsats: Undvik turbulens vid provning!

Hydraulisk konduktivitet – Vad är det?

4. Flödesfall – Darcy gäller endast för laminära flöden, turbulens ställer till det!

- Reynolds tal används för att avgöra flödet

$$Re = \frac{\rho d_{50} v}{\mu} = \frac{\text{inre krafter}}{\text{viskösa krafter}}$$

*Notera att för jordar ansätts
karakteristisk längd till jordens d_{50} -mått*

Turbulens då $Re = 1 - \text{ca } 500$

För utförda laborationer ansattes $Re = 75$ för turbulens

Hydraulisk konduktivitet – Vad mäter vi?

$$\text{Darcys lag} \rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{ixA}$$

Flöde [m³/s]

Gradient, fluidens tryckhöjd/provets längd [m/m]

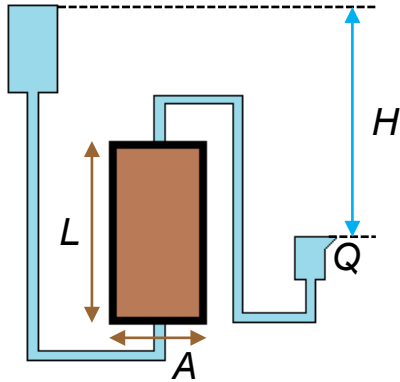
Arean på prov [m²]

Enhet på hydraulisk konduktivitet, K_{sat} , är m/s

Svårare än så är det inte...

Testutrustning – ”Standard”

$$\text{Darcys lag} \rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{ixA}$$



Diameter 50 mm

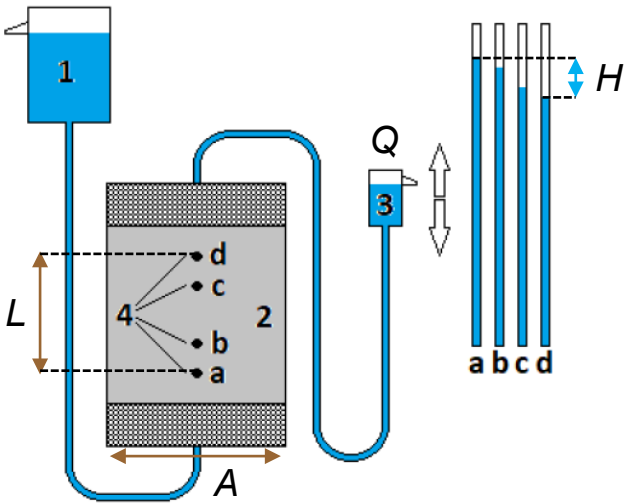
Maximal partikelstorlek 12,5 mm

Slangar större än porsystem



Testutrustning – ”Inte standard”

$$\text{Darcys lag} \rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{ixA}$$



Diameter 1000 mm

Maximal partikelstorlek 250 mm

Slangar MINDRE än porsystem

Under provning ändras endast utloppsnivå (Q [m³/s] ändras)

Turbulens måste undvikas!!



Testutrustning – ”Inte standard”



Tryckförluster

Flöde

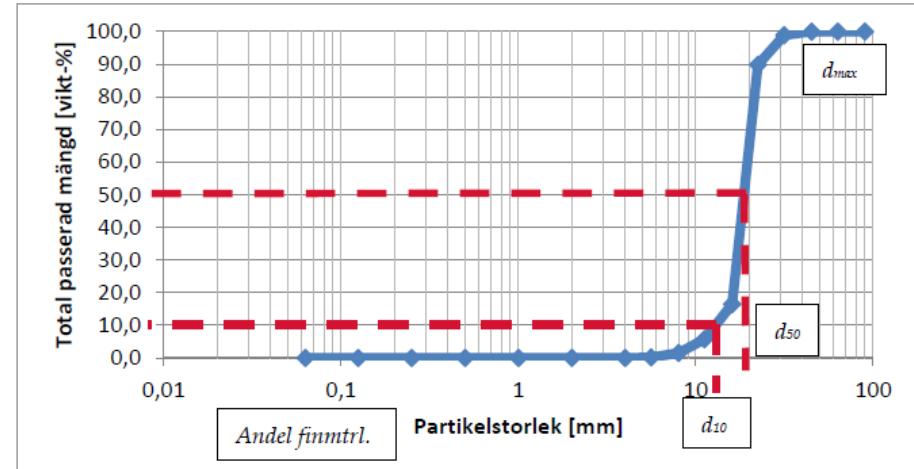
Testutrustning - Provförberedning



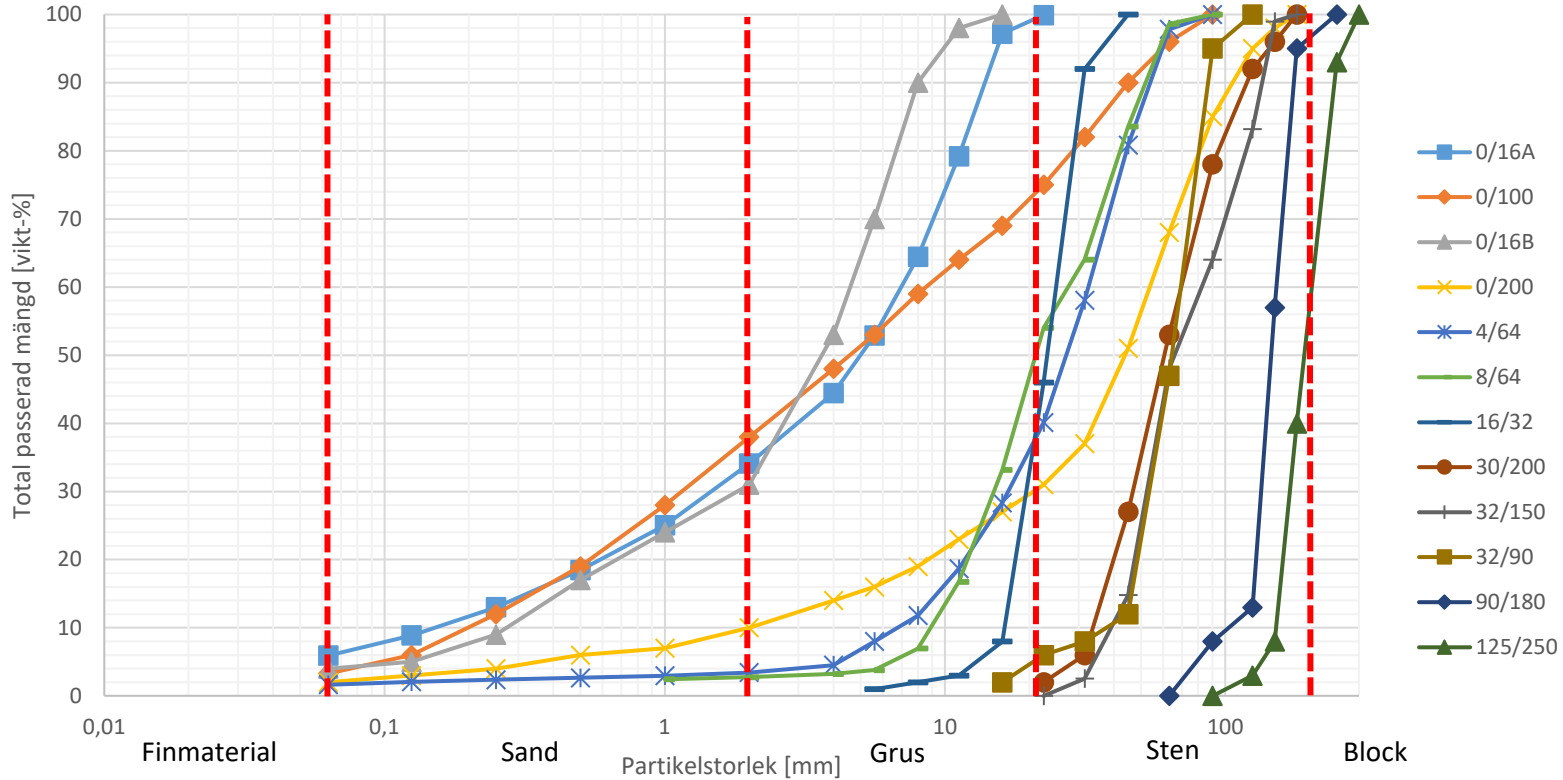
Vattenmätning

Resultat – Typ av jordmaterial

Sortering [mm/mm]	Användning	d_{10} [mm]	d_{50} [mm]	d_{60} [mm]	C_u [d_{60}/d_{10}]
0/16A	Finfilter	0,12	2,3	7,0	58
0/100	Stödfyllning	0,17	5,4	8,3	49
0/16B	Finfilter	0,26	3,7	4,4	17
0/200	Stödfyllning	2	45	80	40
4/64	Grovfilter	7	26	31	4,4
8/64	Grovfilter	11,2	22	25	2,2
16/32	Makadamfyllning	17	21	23	1,4
30/200	Stödfyllning	33	60	70	2,1
32/150	Stödfyllning	40	64	80	2,0
32/90	Rundade stenar, Naturmaterial	40	70	70	1,8
90/180	Rundade stenar, Naturmaterial	105	130	140	1,3
125/250	Rundade stenar, Naturmaterial	160	190	210	1,3



Resultat – Typ av jordmaterial



Resultat – Hydraulisk konduktivitet

Material	Mätning [nr och år]	d_{10} [mm]	Re [n.a.]	Darcy [m/s]	Forchheimer [m/s]
0/16A Finfilter	Nr 5, 2019	0,12	0,2	$4,9 \times 10^{-5}$	
0/100 Stödfyllning	Nr 4, 2019	0,17	0,01	$2,4 \times 10^{-7}$	
0/16B Finfilter	Nr 6, 2019	0,26	2,3	$5,1 \times 10^{-4}$	
0/200 Stödfyllning	Nr 12, 2021	2	100	0,50	1,0
4/64 Grovfilter	Nr 10, 2021	7	40	1,7	
8/64 Grovfilter	Nr 8, 2020	11	15	0,17	
16/32 Makadamfyllning	Nr 7, 2020	17	23,5	0,23	
30/200 Stödfyllning	Nr 11, 2021	33	40,8	1,9	
32/150 Stödfyllning	Nr 9, 2020	40	44	0,24	
32/90 Naturmaterial	Nr 1, 2017	40	43	0,13	
90/180 Naturmaterial	Nr 2, 2018	105	103	0,39	32
125/250 Naturmaterial	Nr 3, 2018	160	140	0,52	86

Diskussion – Mätmetoder

Turbulens ska undvikas då tryckförluster pga turbulens inte kan kvantifieras



Vid låga flöden minskar risken för turbulens



Grova jordmaterial + låga flöden = låga tryckförluster över prov



Mättekniska utmaningar!

Diskussion – Mätmetoder



Tryckskillnad [mm] → H	Mätfel [%]		Mätfel [%]	
	+0,5mm	+0,1mm	-0,5mm	-0,1mm
10	-4,8	-1,0	5,3	1,0
8	-5,9	-1,2	6,7	1,3
6	-7,7	-1,6	9,1	1,7
4	-11,1	-2,4	14,3	2,6
2	-20	-4,8	33,3	5,3
1	-33,3	-9,1	100	11,1
0,8	-38,5	-11,1	167	14,3
0,6	-45,5	-14,3	500	20,0
0,5	-50	-16,7	∞	25,0



2017

2019

2021

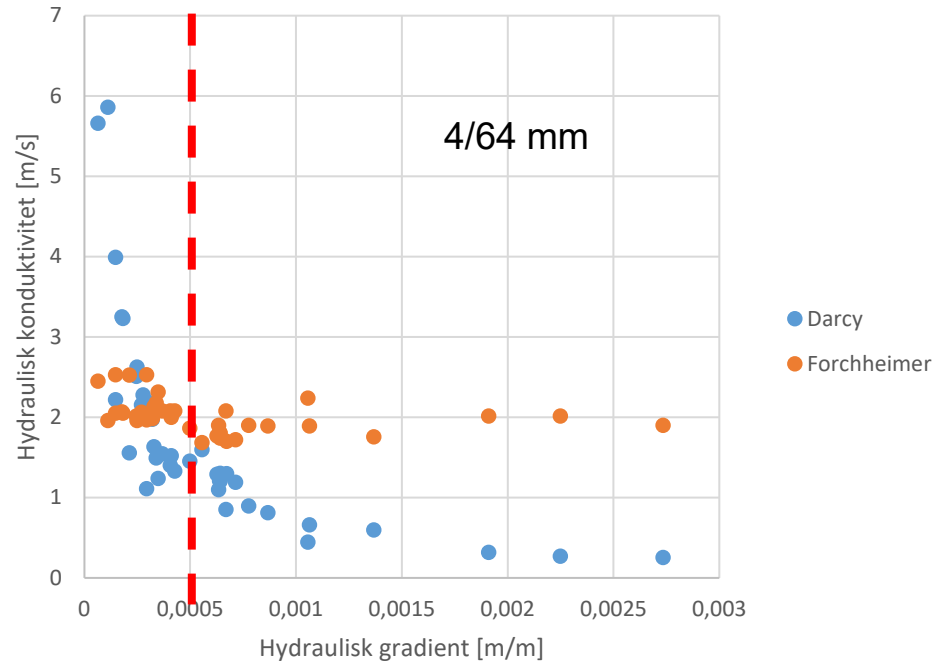
$$\text{Darcys lag} \rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{ixA}$$

$$i = \frac{H}{L} \text{ där } L \text{ är konstant}$$

Diskussion – Mätmetoder

$$\text{Darcys lag} \rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{ixA}$$

Hydraulisk konduktivitet "sticker iväg" vid låga gradienter



Diskussion – Turbulens

Darcys lag $\rightarrow Q = KiA \rightarrow K = \frac{Q}{i \times A}$ \rightarrow Denna del är faktiskt en hastighet.

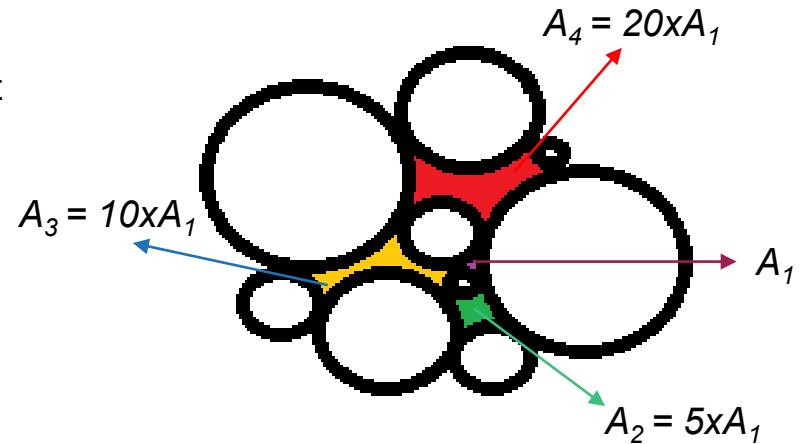
Medelhastighet genom provkropp

$$v_{medel} = \frac{Q}{A}$$

Vi har dock ett poröst material, alltså introducera porositet (vatten kan ej passera genom jordpartiklar)

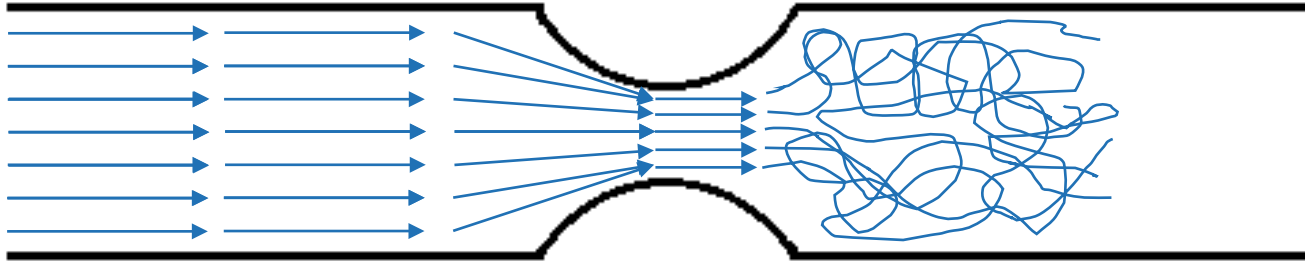
$$v_p = \frac{Q}{nA}$$

Konstant \leftarrow (pointing to Q)
Konstant \leftarrow (pointing to n)
INTE konstant \leftarrow (pointing to A)

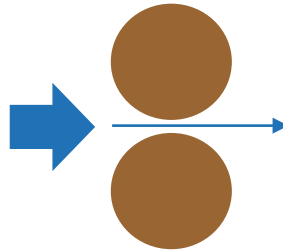


Vid trånga passager kan hastighet, v_p , lokalt bli höga. Lokala tryckändringar!

Diskussion – Turbulens



Strömning över en smalare passage. Finns väldigt många av dessa i våra prover

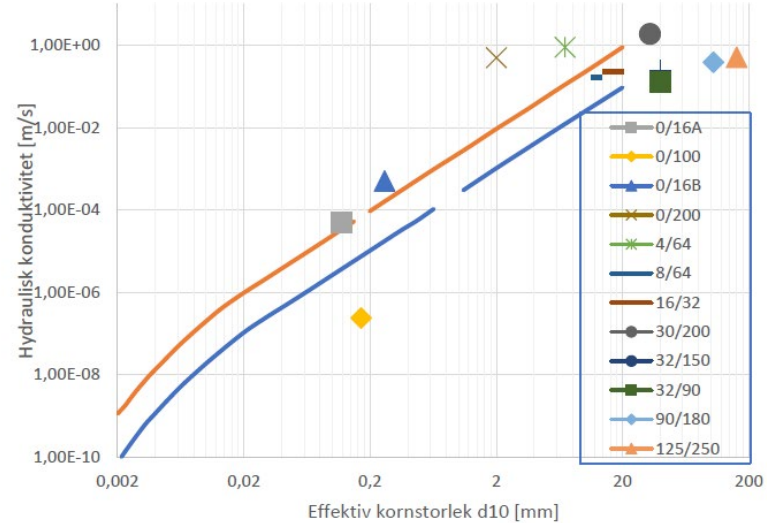
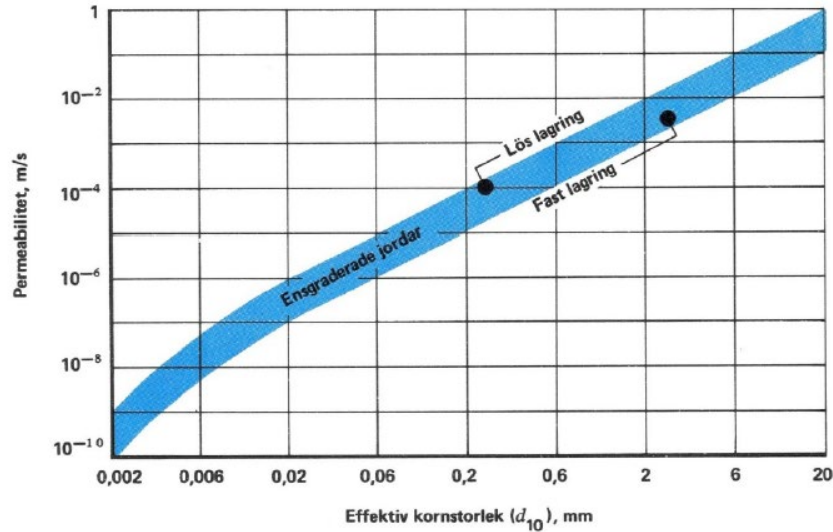


Men... Handlar det verkligen om turbulens då $V_p = 1,5 \times 10^{-6} - 2,2 \times 10^{-3}$ m/s?

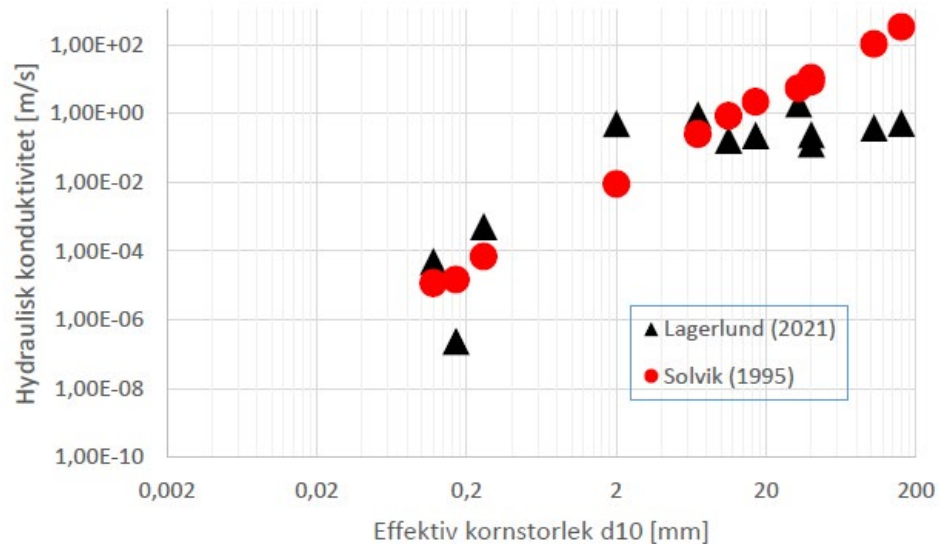
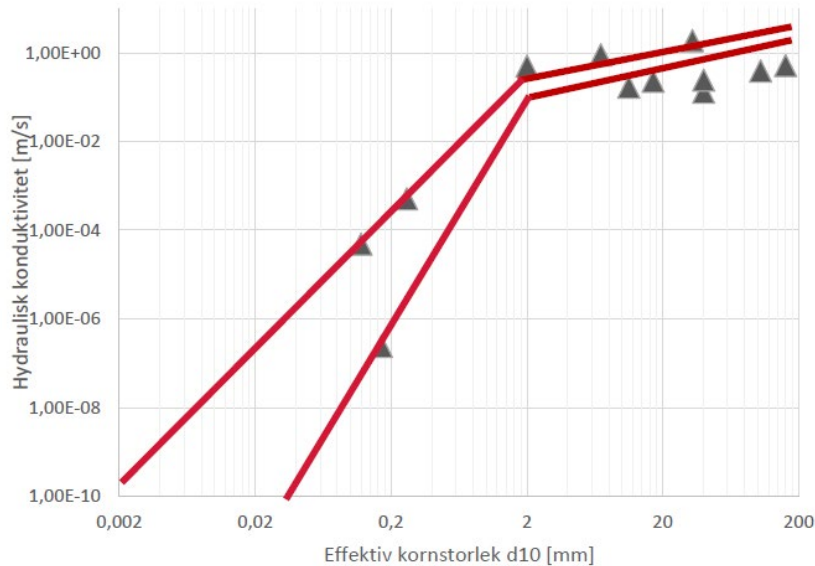
Diskussion – tolkade resultat

Material	Mätning [nr och år]	d ₁₀ [mm]	Re [n.a.]	Hyd. kond [m/s]	Mätosäkerhet [%]
0/16A Finfilter	Nr 5, 2019	0,12	0,2	4,9x10 ⁻⁵	<1
0/100 Stödfyllning	Nr 4, 2019	0,17	0,01	2,4x10 ⁻⁷	<1
0/16B Finfilter	Nr 6, 2019	0,26	2,3	5,1x10 ⁻⁴	<1
0/200 Stödfyllning	Nr 12, 2021	2	100	0,50	-7 till +8
4/64 Grovfilter	Nr 10, 2021	7	40	0,90	-6 till +7
8/64 Grovfilter	Nr 8, 2020	11	15	0,17	-27 till +58
16/32 Makadamfyllning	Nr 7, 2020	17	23,5	0,23	-25 till +49
30/200 Stödfyllning	Nr 11, 2021	33	40,8	1,9	-24 till +45
32/150 Stödfyllning	Nr 9, 2020	40	44	0,24	-32 till +93
32/90 Naturmaterial	Nr 1, 2017	40	43	0,13	-26 till +53
90/180 Naturmaterial	Nr 2, 2018	105	103	0,39	-42 till +245
125/250 Naturmaterial	Nr 3, 2018	160	140	0,52	-50 till +12 500

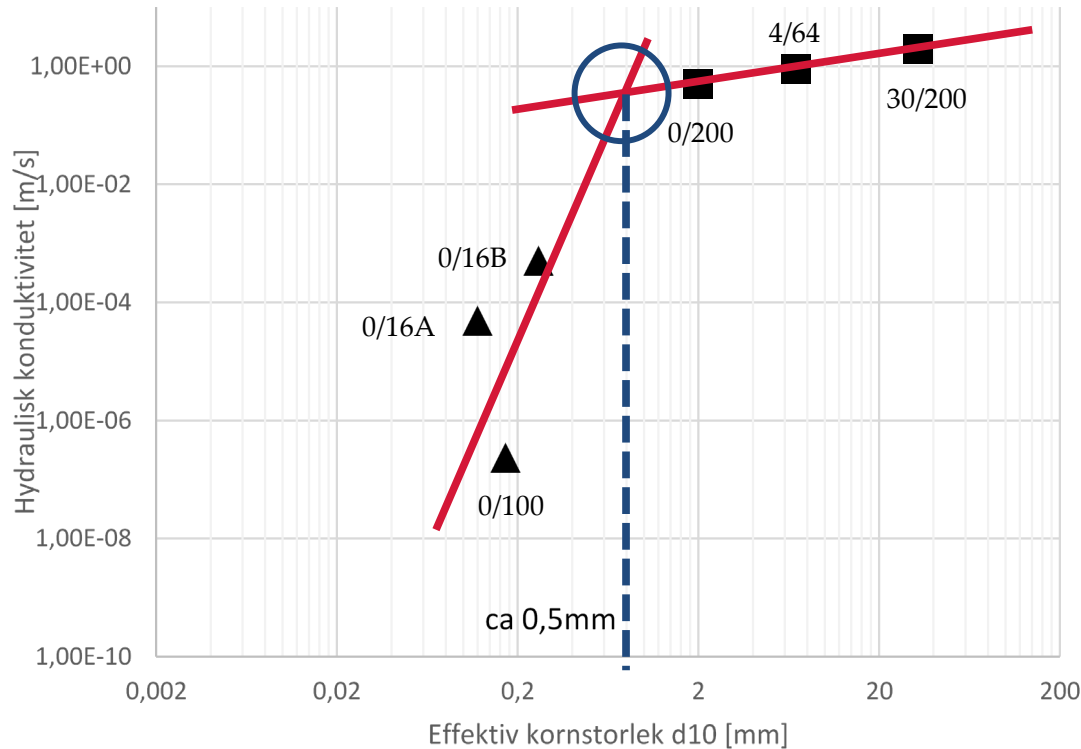
Diskussion – Vad säger ”litteraturen”



Diskussion – Vad säger ”litteraturen”



Diskussion – Vad säger "litteraturen"



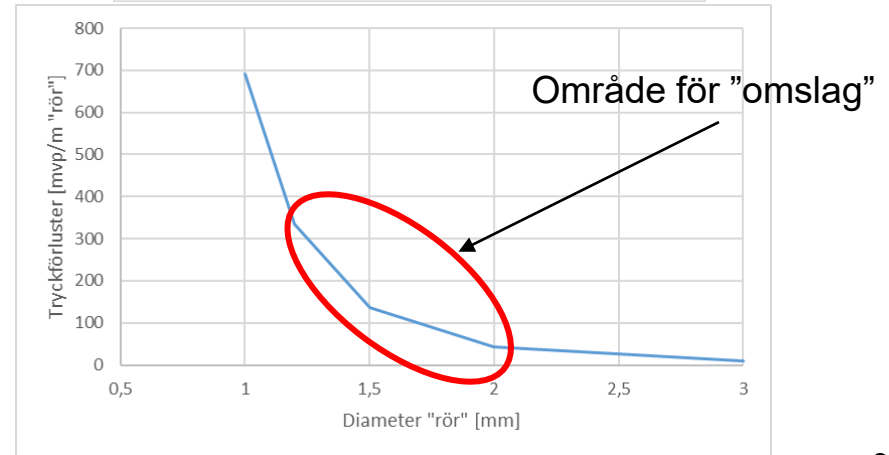
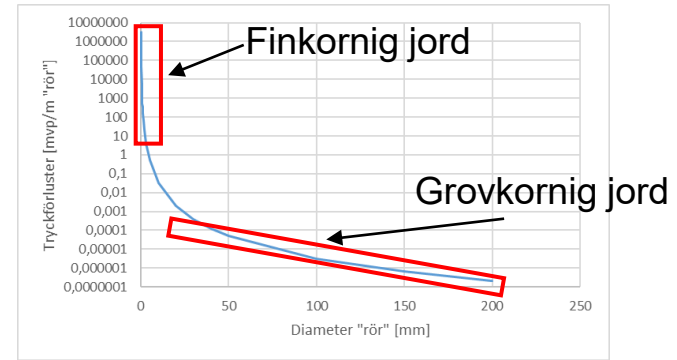
Är detta rimligt?

Låt oss göra ett nytt tankeexperiment!

Diskussion – Vad säger "litteraturen"

- Antag att porsystem i jord är rör
- Diameter på rör = d_{50} jord (karaktäristisk längd)
- Antag konstant flöde
- Minska rördiameter gradvis
- Beräkna rörförluster (Bernouilles Ekv.)!

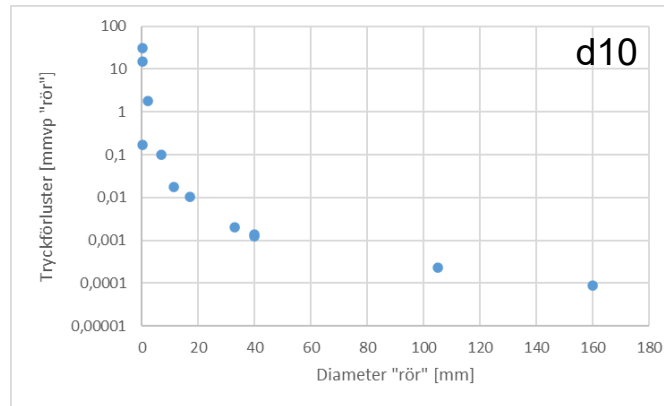
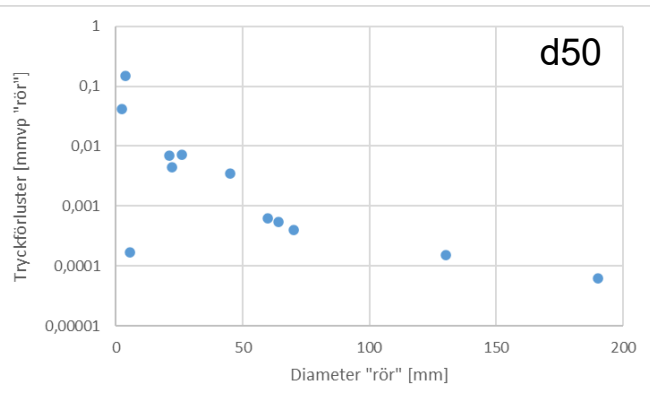
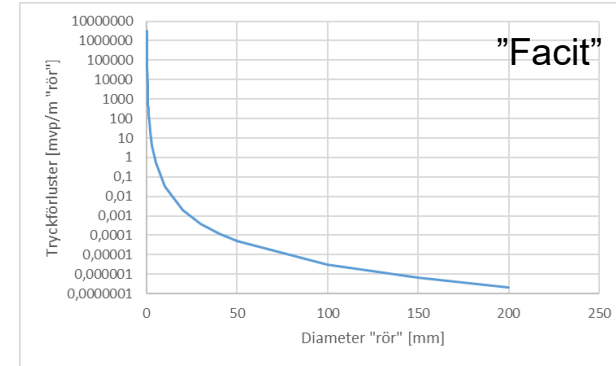
Ser ju lovande ut... Låt oss stoppa in egna värden



Diskussion – Vad säger ”litteraturen”

Material	d50 [mm]	Rörförlust [mmvp]
125/250	190	6,3E-05
90/180	130	0,0002
32/90	70	0,0004
32/150	64	0,0005
30/200	60	0,0006
0/200	45	0,0035
4/64	26	0,0072
8/64	22	0,0045
16/32	21	0,0069
0/100	5,4	0,0002
0/16B	3,7	0,1501
0/16A	2,3	0,0412

Material	d10 [mm]	Rörförlust [mmvp]
125/250	160	8,9E-05
90/180	105	0,0002
32/90	40	0,0012
32/150	40	0,0014
30/200	33	0,0020
16/32	17	0,0105
8/64	11,2	0,0174
4/64	7	0,0999
0/200	2	1,7941
0/16B	0,26	30,4001
0/100	0,17	0,1738
0/16A	0,12	15,1320






Slutsatser

- Mäta hydraulisk konduktivitet på grovkorniga material är tekniskt sett mycket utmanande. Stora fel kan uppstå vid avläsning av tryckfall.
- Presenterade värden är för **laminära** och **vattenmättade** förhållanden. Vid verkligt höga flöden i damm blir dessa troligtvis både turbulenta och ej vattenmättade.
- Presenterade värden är först i sitt slag och kan därför inte jämföras med andras mätningar.
- Presenterade värden indikerar att ökningen i hydraulisk konduktivitet minskar betydligt då allt grövre jordmaterial provas. Mellan 0,5 – 2 mm för d_{10} verkar det ske att omslag.

Vad händer nu?

Ommätning av några material med den senaste mätmetoderna för att minska osäkerheterna i resultaten

Material	Mätning [nr och år]	d ₁₀ [mm]	Re [n.a.]	Hyd. kond [m/s]	Mätosäkerhet [%]
0/16A Finfilter	Nr 5, 2019	0,12	0,2	4,9x10 ⁻⁵	<1
0/100 Stödfyllning	Nr 4, 2019	0,17	0,01	2,4x10 ⁻⁷	<1
0/16B Finfilter	Nr 6, 2019	0,26	2,3	5,1x10 ⁻⁴	<1
0/200 Stödfyllning	Nr 12, 2021	2	100	0,50	-7 till +8
4/64 Grovfilter	Nr 10, 2021	7	40	0,90	-6 till +7
8/64 Grovfilter	Nr 8, 2020	11	15	0,17	-27 till +58
 16/32 Makadamfyllning	Nr 7, 2020	17	23,5	0,23	-25 till +49
30/200 Stödfyllning	Nr 11, 2021	33	40,8	1,9	-24 till +45
32/150 Stödfyllning	Nr 9, 2020	40	44	0,24	-32 till +93
 32/90 Naturmaterial	Nr 1, 2017	40	43	0,13	-26 till +53
90/180 Naturmaterial	Nr 2, 2018	105	103	0,39	-42 till +245
 125/250 Naturmaterial	Nr 3, 2018	160	140	0,52	-50 till +12 500

Frågor?

Johan Lagerlund 13 april 2022