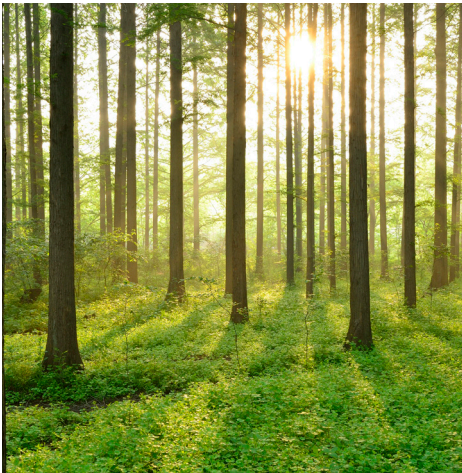


HYDRAULISK KONDUKTIVITET I GROVKORNIGA JORDMATERIAL

RAPPORT 2022:849



Hydraulisk konduktivitet i grovkorniga jordmaterial

JOHAN LAGERLUND

ISBN 978-91-7673-849-8 | © Energiforsk februari 2022

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I detta projekt har laboratorieprovning med storskalig labbutrustning genomförts för att bestämma hydraulisk konduktivitet för grovkorniga jordar som används som filter och stödfyllning i fyllningsdammar.

Genom att utföra verkliga försök och bygga upp en resultatbank för grovkorniga jordar kan utförare i framtiden uppskatta mer representativa värden på hydraulisk konduktivitet för en fyllningsdamm utifrån kornfördelning och packningsgrad. Projektet har genomförts hos Vattenfall R&D med Johan Lagerlund som projektledare. Den referensgrupp som följt projektet bestod av Mårten Jakobsson (Boliden), Jonas Hammarson (Fortum), Olle Runnéus (Uniper), Christian Bernstone (Vattenfall AB), Anders Sjödin (Statkraft) och Sara Töyrö (LKAB).

Projektet har finansierats av Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram med medverkan från industrin, Svenska kraftnät och Svemin. Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

Mellan åren 2017 till 2021 har olika grovkorniga jordmaterial testats med syfte att bestämma deras hydrauliska konduktivitet. Detta har möjliggjorts tack vare ny utrustning som klarar av provning av jordmaterial med maximala stenstorlekar upp till 250 mm. Material som testats är de man kan finna i en fyllningsdamm, nämligen fin-, mellan-, grovfilter, dränagezoner och stödfyllning.

Att känna till den hydrauliska konduktiviteten i en fyllningsdamms olika zoner är viktigt för att avgöra stabilitet vid kraftig genomströmning. Hydraulisk konduktivitet i olika finkorniga jordmaterial är välkänt men inte för grovkorniga jordmaterial. Anledningen till detta är avsaknad av lämplig geoteknisk utrustning samt mättekniska svårigheter i att kvantifiera tryckförluster i grovkorniga jordmaterial.

Bestämning av hydraulisk konduktivitet utfördes på sammanlagt 12 olika jordmaterial. Finkornigt jordmaterial (finfilter) hade en hydraulisk konduktivitet på ca 10-5 m/s medan grovkornigt jordmaterial (grovfilter, dränagezoner samt stödfyllning) hade en hydraulisk konduktivitet på 0,3 – 2 m/s. De nu utförda bestämningarna av hydraulisk konduktivitet i framförallt grovkorniga jordmaterial är högre än vad man idag normalt ansätter vid stabilitetsberäkningar. Av denna anledning är det därför rimligt att anta att man idag vid uppgraderingar av fyllningsdammar överdimensionerar vissa åtgärder.

Flödet genom jordmaterialen under testningen hölls medvetet lågt för att undvika turbulens. Vid turbulenta flöden överskattas tryckförluster vilket innebär att den hydrauliska konduktiviteten kommer att underskattas. På grund av dessa låga flöden kunde tryckfallen över de grovkorniga jordmaterialen bli mycket små (<1 mm). Mättekniska svårigheter uppstod då i att mäta tryckförlusterna och vid så låga tryckförluster blev inverkan av eventuella mätfel mycket stora vid framräkning av hydraulisk konduktivitet. Tryckförlustmätningar för de 9 första mätningarna utfördes manuellt (mätfel $\pm 0,5$ mm) medan de 3 sista mätningarna var automatiserade (mätfel $\pm 0,1$ mm).

Då den hydrauliska konduktiviteten plottades mot jordmaterialens effektiva kornstorlek framkom det att ändringen i hydraulisk konduktivitet var kraftigare för finkorniga jordmaterial jämfört med grovkorniga. Detta kan indikera att Darcys lag ändrar förutsättningar ju mer grovkornig en jord blir. Alltså: skillnad i hydraulisk konduktivitet då en jord med effektiv kornstorlek 0,1 mm jämförs med en på 1,0 mm är större än då en jord med effektiv kornstorlek på 10 mm jämförs med en på 100 mm.

Fler grovkorniga jordmaterial bör testas med den automatiserade mättekniken för att förbättra det statistiska underlaget.

Nyckelord: Hydraulisk konduktivitet, fyllningsdammar, grovkorniga jordmaterial, filter, stödfyllning, Darcy, Forchheimer

Summary

Between the years 2017 and 2021 different coarse grained soil materials have been tested to determine their hydraulic conductivity. This has been made possible thanks to new equipment that enables testing of soil materials with maximum particle sizes of 250 mm. Tested materials were those who are commonly found within an embankment dam, i.e., filters, drainage zones and structural fills.

To know the hydraulic conductivity of the different soil types in an embankment dam is an important factor when estimating its safety factor at higher seepage rates. Hydraulic conductivities in fine grained soils are well known but not for coarser soils. The reason for this is lack of suitable testing equipment and difficulties in quantifying pressure losses of water when testing coarse grained soils.

Determination of hydraulic conductivity was done on a total of 12 different soil types commonly found in embankment dams. Fine grained soil material (fine filter) had a hydraulic conductivity of ca 10⁻⁵ m/s while coarser grained soil material (coarse filters, drainage zones and structural fill) had hydraulic conductivities between 0,3 – 2 m/s. Hydraulic conductivity in the coarse-grained soil materials were found to be higher than the values commonly used today when producing stability analysis of embankment dams. For this reason, it may be assumed that certain upgrades of embankment dams today are over engineered.

The water flow through the soil materials were kept low to avoid turbulence. For this reason, the pressure losses for the coarser grained soils could become very low (<1 mm). Technical issues then occurred when measuring the pressure losses and at such low losses the influence of eventual measurement errors became high when calculating the hydraulic conductivity. Measurement of pressure losses for the first 9 measurements were done manually (error ±0,5 mm) and for the last 3 they were automatized (error ±0,1 mm).

When the hydraulic conductivity was plotted versus the effective particle size of the soil materials it was found that the rate of change for the hydraulic conductivity was steeper for fine grained soil materials compared to coarse grained soil materials. This may indicate that Darcys law changes assumptions the more coarse grained a soil material becomes.

More coarse-grained soil materials should be tested with the automatized measurement equipment to improve the statistical basis.

Key words: Hydraulic conductivity, embankment dams, coarse grained soil materials, filter, support fill, Darcys law, Forchheimer

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Syfte och mål	8
2	Introduktion	9
2.1	Hydraulisk konduktivitet	11
2.1.1	Hydraulisk gradient	11
2.1.2	Flödesfall	12
2.1.3	Inverkan av kornfördelning	14
2.1.4	Inverkan av kompaktering	16
2.1.5	Inverkan av luft	17
2.2	Rörpermeameter	17
3	Material och Metoder	19
3.1	Material	19
3.2	Permeameterens utformning	21
3.3	Provberedning	24
3.4	Provningsgenomförande	26
3.5	Geotekniska egenskaper	28
3.6	Bestämning av hydraulisk konduktivitet	29
4	Resultat	30
4.1	0/16A Finfilter	31
4.1.1	Geotekniska egenskaper	31
4.1.2	Hydrauliska egenskaper	31
4.2	0/100 Stödfyllning	32
4.2.1	Geotekniska egenskaper	32
4.2.2	Hydrauliska egenskaper	32
4.3	0/16B Finfilter	33
4.3.1	Geotekniska egenskaper	33
4.3.2	Hydrauliska egenskaper	33
4.4	0/200 Stödfyllning	34
4.4.1	Geotekniska egenskaper	34
4.4.2	Hydrauliska egenskaper	35
4.5	4/64 Grovfilter	36
4.5.1	Geotekniska egenskaper	36
4.5.2	Hydrauliska egenskaper	36
4.6	8/64 grovfilter	37
4.6.1	Geotekniska egenskaper	37
4.6.2	Hydrauliska egenskaper	37
4.7	16/32 makadamfyllning	38
4.7.1	Geotekniska egenskaper	38
4.7.2	Hydrauliska egenskaper	38

4.8	30/200 Stödfyllning	39
	4.8.1 Geotekniska egenskaper	39
	4.8.2 Hydrauliska egenskaper	39
4.9	32/150 Stödfyllning	40
	4.9.1 Geotekniska egenskaper	40
	4.9.2 Hydrauliska egenskaper	40
4.10	32/90 Naturmaterial	41
	4.10.1 Geotekniska egenskaper	41
	4.10.2 Hydrauliska egenskaper	41
4.11	90/180 naturmaterial	42
	4.11.1 Geotekniska egenskaper	42
	4.11.2 Hydrauliska egenskaper	43
4.12	125/250 naturmaterial	44
	4.12.1 Geotekniska egenskaper	44
	4.12.2 Hydrauliska egenskaper	45
5	Diskussion	46
5.1	Resultatens tillförlitlighet	46
	5.1.1 Manuella mätningar	47
	5.1.2 Automatiserade mätningar	48
	5.1.3 Hydrauliska gradienter och flödesfall	50
5.2	Tolkning av Resultat med hänsyn tagen till diskussion	52
5.3	Nya resultat i relation till gamla	53
5.4	Luftproblematik	57
6	Slutsatser	59
7	Fortsatt forskning	61
8	Referenslista	62

1 Inledning

För att en fyllningsdamm ska fungera säkert måste dess olika zoner vara korrekt dimensionerade. För exempelvis filter, stödfyllning och dränagezoner bör dessa utformas så att vatten lätt kan ledas genom utan att höja omkringliggande portryck. Som hjälp vid denna dimensionering används enheten hydraulisk konduktivitet. Ett jordmaterials hydrauliska konduktivitet är ett mått på hur enkelt vatten kan passera genom det. Ett finkornigt jordmaterial har exempelvis en lägre hydraulisk konduktivitet än ett grovkornigt. Att känna till den hydrauliska konduktiviteten för dessa grovkorniga (dränerande) zoner ger ett bättre underlag vid korrekt dimensionering. Detta garanterar att en fyllningsdamm kan genomströmmas utan att dammkroppen skadas. Enligt Ekström et al. (2019) saknas det idag viktiga materialparametrar för att kunna framställa bättre probabilistiska säkerhetsfaktorer för fyllningsdammar.

För grovkorniga jordmaterial, som normalt används i exempelvis grovfilter och stödfyllningar av sprängsten, uppkommer vissa praktiska problem vid laborativ bestämning av den hydrauliska konduktiviteten. Normalt bestäms hydraulisk konduktivitet endast på finkorniga jordar i permeametrar med diameter 50 mm. Sådan utrustning begränsar dock möjligheter att testa jordmaterial med större korn än ca 12,5 mm. Av denna anledning är hydrauliska konduktiviteten på grovkorniga jordar relativt okänd.

1.1 SYFTE OCH MÅL

Inom detta projekt har en laborativ utrustning byggts vid Vattenfall R&D:s forskningslaboratorium i Älvkarleby med möjlighet att testa jordmaterial med kornstorlek upp till ca 250 mm. Det är nu möjligt att bestämma hydraulisk konduktivitet även för grovkorniga jordmaterial.

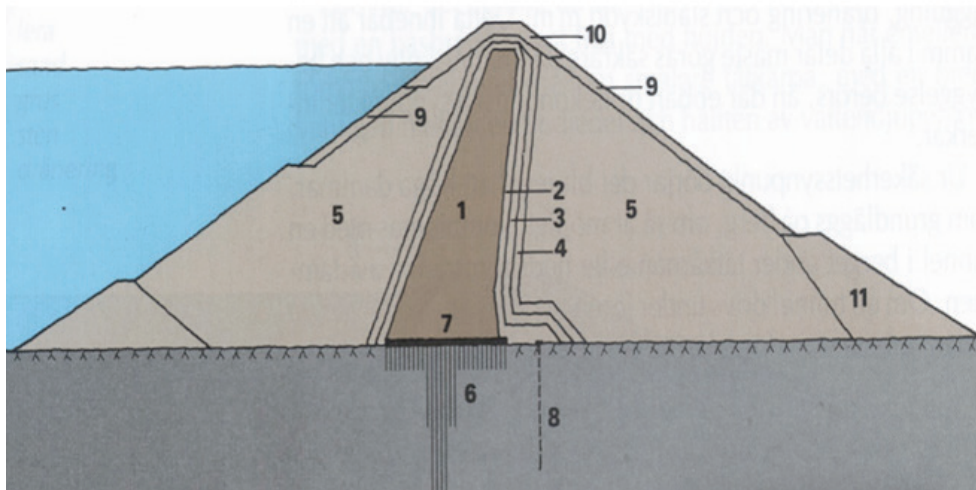
I rapporten ingår följande:

- Beskrivning av hydraulisk konduktivitet, hur den bestäms samt de faktorer som påverkar resultatet.
- Laborativ mätmetod som använts inom projektet samt mättekniska utmaningar för denna typ av testning av grovkorniga jordmaterial.
- Resultat och analys från mätningar av sammanlagt 12 olika jordmaterial.
- Förslag för fortsatt forskning

2 Introduktion

Fyllningsdammar har använts i tusentals år för att skydda mot översvämningar, lagra vatten till bevattning och i närtid för att producera elektricitet.

Fyllningsdammar är konstruktioner uppbyggda av sten och jordmaterial. Moderna fyllningsdammar är byggda i zoner, Figur 1, där varje zon har en specifik funktion. Den centrala delen (1) består av kompakterad morän med uppgift att hålla kvar vatten i magasinet. Moränen är omgiven av filterzoner (2, 3 och 4) vars huvudsakliga uppgift är att förhindra att de finkornigaste partiklarna i moränen eroderar ut. Filterzon (2) benämns som finfilter och består av ett mer finkornigt material än det utanpåliggande mellanfiltret (3). Ibland förekommer även ett grovfilter (4) vars kornfördelning är mer grovkornigt än mellanfiltrets. Utanför det grövsta filtret finns stödfyllningen (5) som är den del av fyllningsdammen som bidrar till dess strukturella stabilitet. Utöver dessa zoner finns även dammtån (11) som skyddar fyllningsdammen även vid höga läckageflöden samt erosionskydd (9 och 10).



Figur 1. En fyllningsdamms med lutande tätkärna samt tre filter. Vattenfall (1988).

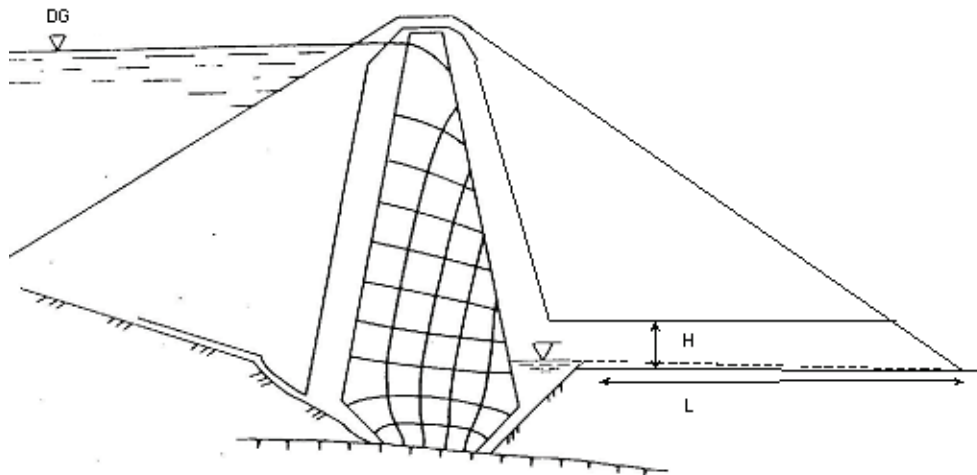
Stödfyllningen är vanligtvis den zon av dammen som har störst volym. Det är stödfyllningens utformning och egenskaper som till stor del avgör fyllningsdamms stabilitet. Ju finkornigare stödfyllningen är desto mer känslig kan den vara för portrycksvariationer. Om portrycken ökar i stödfyllningen minskar dess stabiliteten varför skaderisk ökar. I de fall ökning av portryck i stödfyllning sker över längre tid kan detta vara en indikator på att inre erosion sker. En snabb ökning av portryck indikerar mer på att läckagevatten plötsligt öppnat upp en ny väg genom dammens tätjord/undergrund. Av denna anledning måste stödfyllningen utformas för att ha erforderlig erosionsstabilitet för att tåla genomströmning och utläckage, RIDAS (2020). Fyllningsdammar dimensioneras därför att tåla ett visst läckvattenflöde utan att skadas, i.e. dimensionerande läckageflöde.

Dränagezoner i en fyllningsdamm har till uppgift att på ett säkert sätt leda läckagevatten till en utloppspunkt på nedströmssidan. Detta görs för att inga höga portryck skall uppstå i fyllningsdammens stödfyllning. Exempel på en dränagezon visas i Figur 2.

För att öka en fyllningsdamms dränagekapacitet kan man generellt säga att ju grovkornigare jordmaterial som används desto högre blir dränagekapaciteten vilket i sin tur leder till bättre stabilitet vid höga läckageflöden. Dimensionering av dränaget görs med hjälp av ekvation [1]

$$K = \frac{q}{(i \times H)} \quad [1]$$

Där K = hydraulisk konduktivitet på materialet (m/s), q = flödet (m³/s), i = hydraulisk gradient (H/L), H = dränagelagrets tjocklek (m) och L = dränagelagrets längd (m)



Figur 2. Exempel på ett dränagelager (RIDAS 2020).

För att på ett säkert sätt kunna dimensionera både stödfyllning och dränagezoner, enligt ekvation [1], är det centralt att medelst labbförsök kvantifiera jordmaterialets hydrauliska konduktivitet. En bestämning av detta värde ger bättre underlag för dimensionering av faktorerna H och L .

I detta avsnitt beskrivs hydraulisk konduktivitet, vilka faktorer som påverkar den samt vilka laborativa metoder som kan användas för att bestämma den. Fokus ligger på bestämning av hydraulisk konduktivitet i grovkorniga jordmaterial av den typ som ofta används i stödfyllningar/dränagezoner.

2.1 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Begreppen hydraulisk konduktivitet, K , mättad hydraulisk konduktivitet, K_s , permeabilitet, k , och inre permeabilitet, K_i , är ofta de begrepp som används för att beskriva ett materials hydrauliska konduktivitet. Dock finns det skillnader dem emellan.

- Hydraulisk konduktivitet, K , är ett mått på hur "enkelt" vatten kan passera ett jordmaterial. K ändras då jordmaterialet porstruktur ändras (dess inre permeabilitet K_i), vattenmättnadsgraden samt vattnets densitet, flöde och gradient. Enheten är m/s.
- Mättad hydraulisk konduktivitet, K_s , är hydraulisk konduktivitet då flödet sker i ett vattenmättat jordmaterial. Enheten är m/s.
- Permeabilitet, k , eller inre permeabilitet, K_i , är endast en beskrivning av jordmaterialets genomsläpplighet utan att beakta den fluid som strömmar genom. I enkla ordalag beskriver den arean på de porer i jordmaterialet som en fluid kan transporteras genom. Enheten är darcy (D) och $1 \text{ darcy} = 9,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2$.

För att bestämma den hydrauliska konduktiviteten används Darcys lag. Darcys lag gör gällande att vid en specifik hydraulisk gradient, i , och tvärsnittsarea, A (m^2) kommer vattenflödet, Q (m^3/s) genom ett jordmaterial att bero på dess hydrauliska konduktivitet, K (m/s) enligt ekvation [2].

$$Q = KiA \quad [2]$$

Då K söks kan ekvation [2] skrivas om till ekvation [3],

$$K = \frac{Q}{iA} \quad [3]$$

Darcys lag ger ett linjärt förhållande mellan flöde och hydraulisk gradient och gäller bara vid laminär strömning. Vidare måste det genomströmmade jordmaterialet vara vattenmättat för att Darcy ska gälla.

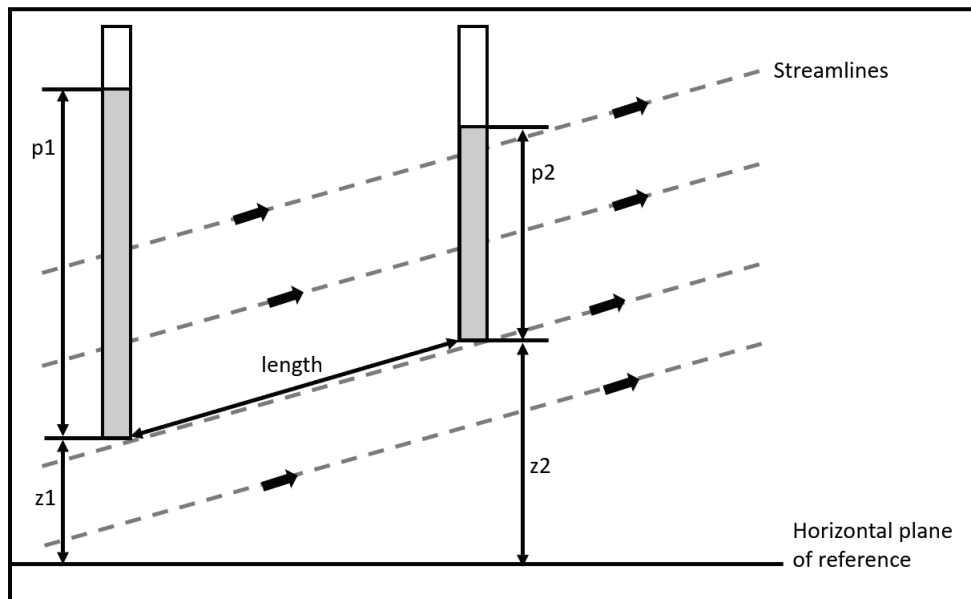
2.1.1 Hydraulisk gradient

Den hydrauliska gradienten, i , kan definieras som den drivande kraften bakom vattnets flödesriktning genom jordmaterialet. Finns det ingen gradient blir flödet noll eftersom systemet är i jämvikt. Vattenpotential, h (m), är vattnets höjd över en antagen horisontell referenslinje och den hydrauliska gradienten är skillnaden mellan två vattenpotentialer dividerat med sträckan dem emellan (l), ekvation [4]

$$i = \frac{(h_1 - h_2)}{l} \quad [4]$$

Vattnets potential kan vidare även innehålla både lägespotential och tryckpotential. Enligt Figur 3 kan då ekvation [4] skrivas om till ekvation [5],

$$i = \frac{(p_1 + z_1) - (p_2 + z_2)}{l} \quad [5]$$



Figur 3. Trycksänkning av vatten mellan två punkter vid beräkning av den hydrauliska gradienten (Chesworth et al., 2021).

Vid laborativa mätningar är det dock vanligast att endast vattnets höjd över en antagen horisontell linje beaktas. Ekvation [4] kan därför användas i ekvation [2] vilket ger ekvation [6]

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{l} \quad [6]$$

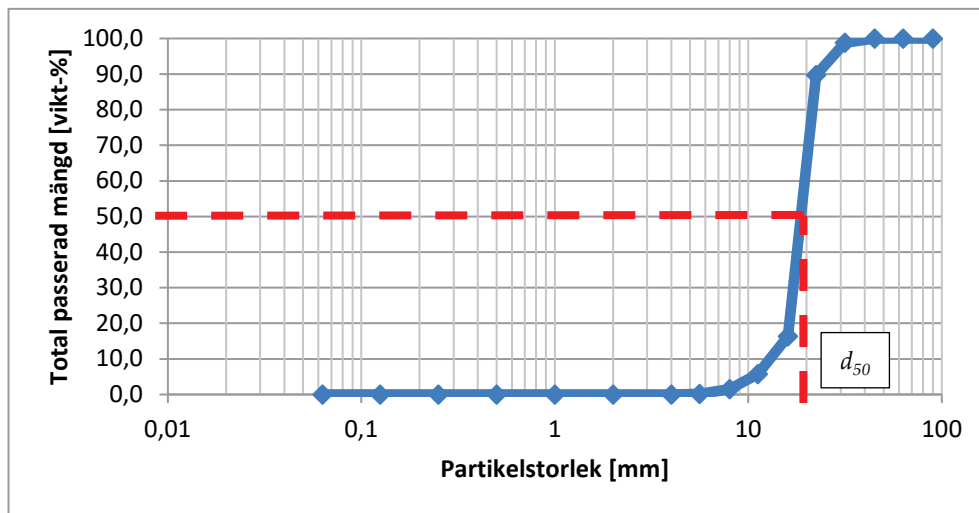
Då K söks kan ekvation [6] skrivas om till ekvation [7],

$$K = \frac{Ql}{(h_1 - h_2)A} \quad [7]$$

2.1.2 Flödesfall

$$Re = \frac{\rho d_{50} v}{\mu} = \frac{\text{Inre krafter}}{\text{Viskösa krafter}} \quad [8]$$

Där ρ är vattnets densitet [kg/m^3], d är jordmaterialets karakteristiska längd [m], v är vattnets flödes hastighet genom jordmaterialet [m/s] och μ är vattnets dynamiska viskositet [Pa s]. Jordmaterialets karakteristiska längd kan enligt Dan et al (2016) sättas till jordens d_{50} -mått. Detta innebär den kornstorlek som utläses ur en kornfördelning av ett jordmaterial som är grövre än de finaste 50 vikt-% av den siktade jorden (se exempel vid Figur 4).



Figur 4. Exempel på utläsning av d_{50} . I figur är d_{50} ca 19 mm.

Antagande av d_{50} – måttet är en förenkling av verkliga jordmaterial på grund av den komplexitet som råder i jordens porstruktur, Zhengwen och Grigg (2006). Flöde i ett poröst media skiljer sig mot rörströmning eftersom "skarpa" gränser mellan laminärt-/turbulent flöde ej förekommer. Av denna anledning finns det i litteraturen stor spridning av kritiska Reynolds tal där strömning går från laminärt till turbulent. Bear (1972), Hassanizadeh och Gray (1987), Ma och Ruth (1993) och Comiti et al. (2000) föreslog att gränsen går vid $Re = 1 - 15$. Scheidegger (1974) föreslog att gränsen gick vid $Re = 75$. Jolls och Hanratty (1966), Latifi et al. (1989), Rode et al. (1994) och Seguin et al. (1998) föreslog gränser på Re mellan 300 – 533. På grund av dessa spridningar i Re föreslog van Lopik et al. (2017) att ett icke linjärt laminärt flöde inträffar mellan laminärt och turbulent flöde i porösa jordmaterial. Då icke linjära laminära flöden påbörjas antas detta bero på uppkomst av små virvlar i jordmaterialets porvolym, Dybbs och Edwards (1984) samt Seguin et al. (1998). För fullt utvecklad turbulens angav Ferdos et al. (2015) $Re = 60\,000$ som undre gräns i sprängsten.

Vid turbulenta flöden ändras inte tryckförlusten i provet linjärt med ökad flödeshastighet. Av denna anledning föreslog Forchheimer (1901) en ekvation [9] för att kunna beräkna hydrauliska gradienter även vid turbulenta flöden. Forchheimers ekvation har verifierats laborativt av bland annat Venkataraman och Rao (1998) samt Bordier och Zimmer (2000).

$$i = av + bv^2 \quad [9]$$

Begreppet hydraulisk gradient, i , enligt ekvation [2], ersätts därmed med Forchheimer, ekvation [9]. Ekvation [2] blir då:

$$Q = KA(av + bv^2) \quad [10]$$

Då K eftersöks i ekvation [10] kan denna brytas ut

$$K = \frac{Q}{A(av + bv^2)} \quad [11]$$

I ekvation [9, 10 och 11] är a och b konstanter medan v är vattnets hastighet i jordmaterialets porer i m/s. Konstanter enligt ekvation [12, 13 och 14] är empiriskt framtagna och baseras på antaganden och förenklingar av framförallt porgeometrierna i de testade jordmaterialen.

$$a = \frac{150v(1-n)^2}{gn^3d^2}, \quad b = \frac{1,75(1-n)}{gn^3d} \quad (\text{Ergun, 1952}) \quad [12]$$

$$a = \frac{144v(1-n)^2}{gn^3d^2}, \quad b = \frac{2,4(1-n)}{gn^3d} \quad (\text{Kovacs, 1981}) \quad [13]$$

$$a = \frac{255v(1-n)}{gn^{3,7}d^2}, \quad b = \frac{2(1-n)}{gn^3d} \quad (\text{Kadlec och Knight, 1996}) \quad [14]$$

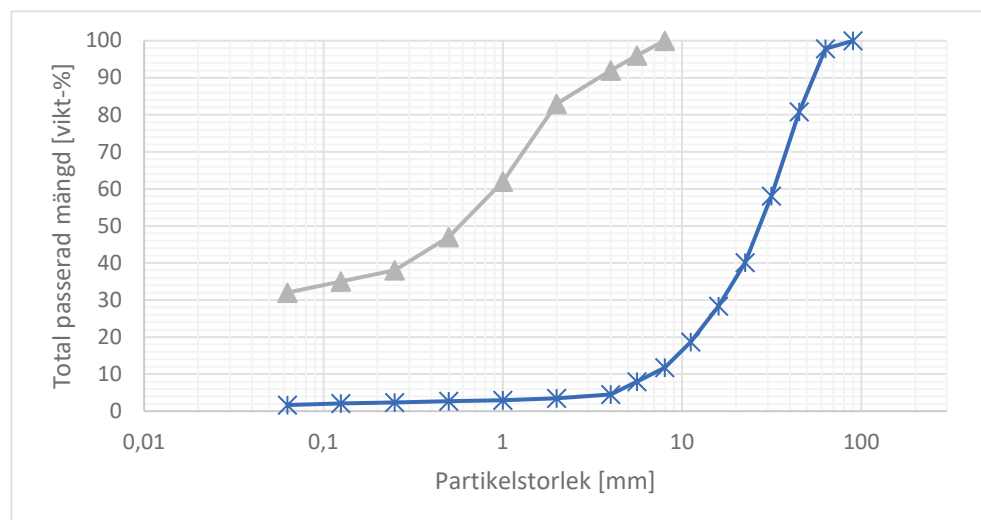
Vattnets hastighet genom jordmaterialet i permeameteren beräknas enligt ekvation [15] och det är denna hastighet som används både för att räkna fram Re (ekvation [8]) samt Forchheimer (ekvation [11]).

$$V_p = \frac{Q}{nA} \quad [15]$$

Där Q är vattenflödet (m^3/s), n är jordmaterialets porositet och A är jordmaterialets tvärsnittsarea under provningen.

2.1.3 Inverkan av kornfördelning

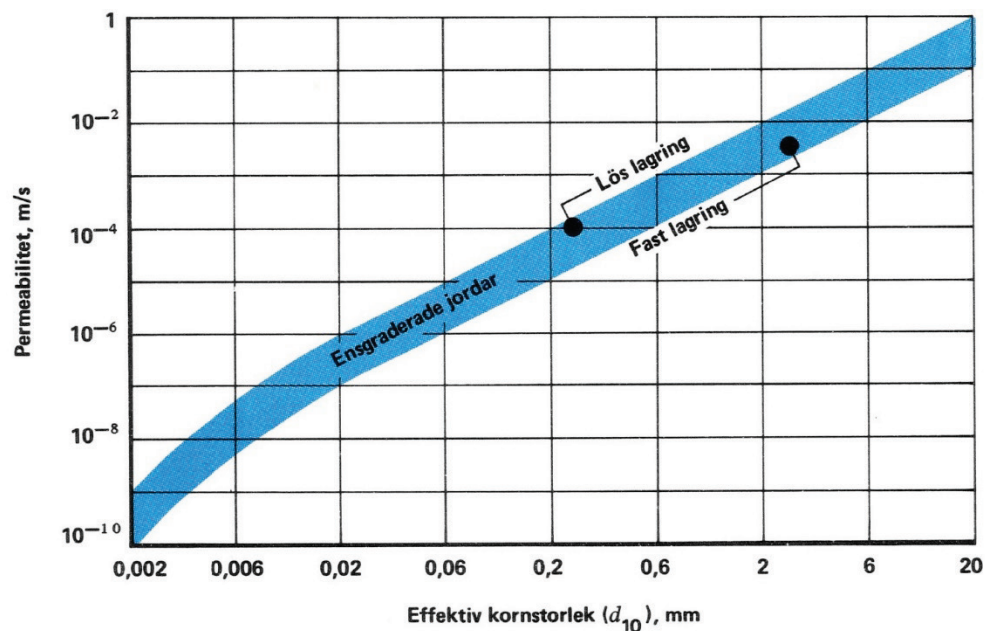
Bouwer (1966) hävdar att porstorlek samt porgeometrier är de faktorer som mest påverkar ett jordmaterials hydrauliska konduktivitet. Dan et al. (2016) fann att halten av ett jordmaterial med kornstorlek $<0,075$ mm kan användas för att förutsäga den hydrauliska konduktiviteten. Enligt Hölting och Coldewey (2019), Vattenfall (1988) och Tennakoon et al (2012) är det den finkorniga delen av en jord som avgör dess hydrauliska konduktivitet och om denna andel ökar så minskar den hydrauliska konduktiviteten, Figur 5.



Figur 5. Två olika kornfördelningar. Grå kornkurva med trianglar håller en större andel finmaterial än den blå kornkurvan med kryss. Den finkornigare jorden (grå kurva) kommer således att ha en lägre hydraulisk konduktivitet än den grövre (blå kurva).

Bağci et al. (2014) utförde bestämning av hydraulisk konduktivitet för stålkulor med diameter 1 mm och 3 mm vid identiska porositeter. Tryckförlusterna vid provningen var ca 5 gånger högre när stålkulor med 1 mm diameter användes jämfört med då stålkulorna var 3 mm. Detta visade att mindre "korn" skapar trängre och krokigare flödesvägar för passerande vatten så att vattentrycket sänks mer. Sammantaget innebär detta att hydraulisk konduktivitet minskar ju mer finkornigt ett jordmaterial är.

Fagerström och Wiesel (1972) använde sig av konceptet effektiv kornstorlek för att enklare uppskatta en jords hydrauliska konduktivitet. Effektiv kornstorlek är jordens d_{10} mått (mm). Ju lägre den effektiva kornstorleken är desto mer finmaterial innehåller jordmaterialet. Vid lägre effektiv kornstorlek minskar således jordmaterialets hydrauliska konduktivitet. Detta visualiseras i Figur 6.



Figur 6. Förhållande mellan hydraulisk konduktivitet och effektiv kornstorlek i ensgraderade jordar. Notera y-axelns benämning "permeabilitet" vilket bör skrivas som hydraulisk konduktivitet. Fagerström och Wiesel (1972).

I Vattenfall (1988) samt Espeby & Gustafsson (1998) kan man hitta information kring hydraulisk konduktivitet för ensgraderade jordmaterial i olika storlekar. Dessa värden visas i Tabell 1.

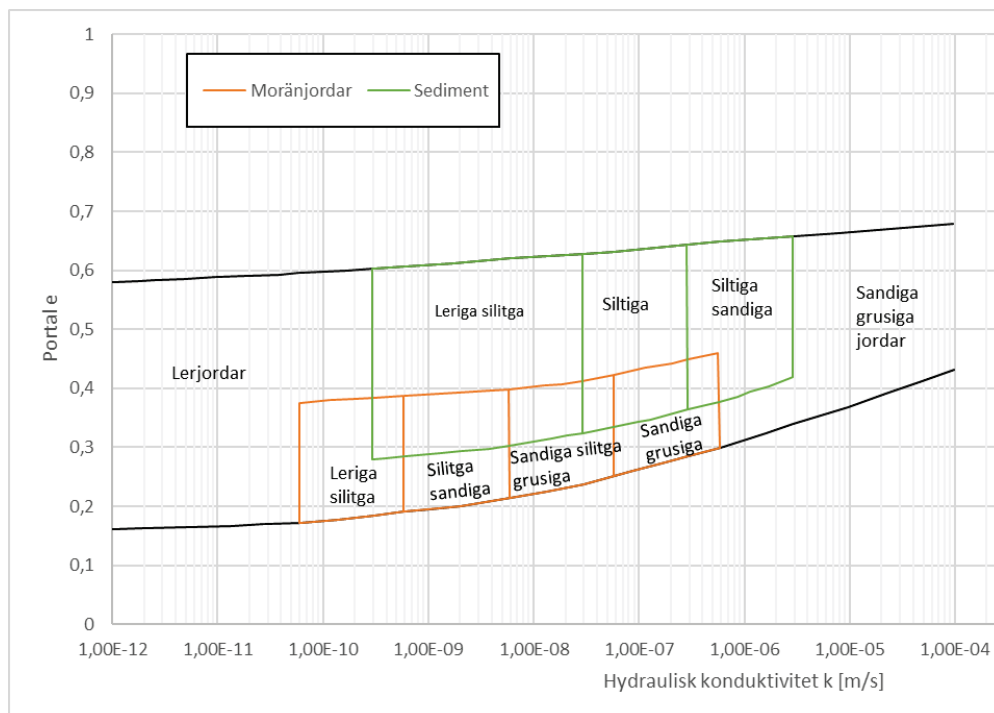
Tabell 1. Överslagsvärden på hydraulisk konduktivitet för olika jordmaterial enligt Larsson (2008).

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	$< 10^{-9}$

För värden presenterade i Tabell 1 är det den vertikala hydrauliska konduktiviteten som presenteras. För tätare jordmaterial, som exempelvis morän, gäller olika hydrauliska konduktiviteter i vertikal- och horisontalled. Den tekniska benämningen på detta är anisotropi, vilket innebär att då en morän kompakteras blir det enklare för vatten att passera horisontellt moränen än vertikalt. I de små zonerna mellan kompakteringslagren kommer därför vatten kunna passera enklare horisontellt sett än vertikalt mot kompakteringen. Anisotropi är obetydlig för grovkorniga jordmaterial.

2.1.4 Inverkan av kompaktering

Kompaktering av ett jordmaterial minskar volymen av porer i ett jordmaterial. En jord med en hög porositet/porositet är alltså sämre kompakterad än samma jord med lägre porositet. Dan et al. (2016) testade tre olika jordmaterial med fraktioner 0 – 5 mm, 5 – 10 mm och 10 – 20 mm. Vid dessa försök påvisades ett linjärt samband mellan kompaktering och hydraulisk konduktivitet för packningsgrader över 90 %. Den hydrauliska konduktiviteten minskar således ju mer ett jordmaterial kompakteras. Packning av jordmaterial sänker den hydrauliska konduktiviteten mer då jordmaterialet är finkornigt än om det är grovkornigt, Vattenfall (1988). I och med bättre kompaktering blir det "svårare" för vatten att passera genom jordmaterialet vilket leder till sänkt hydraulisk konduktivitet. Kompakteringens inverkan på finkorniga jordar visas i Figur 7.



Figur 7. Portalets inverkan på finkorniga jordmaterial. Bernell (1957). Lägre portal, e , innebär lägre porvolym och därmed högre torrdensitet i ett jordmaterial.

2.1.5 Inverkan av luft

Eftersom hydraulisk konduktivitet är beroende av jordmaterialets tvärsnittsarea kan instängd luft i porerna kraftigt påverka mätresultatet. Luft i jordmaterialets porsystem kan ändra vattnets möjliga flödesvägar och därmed minska den framräknade hydrauliska konduktiviteten, Mohanty et al. (1994). Både Sedghi et al. (2014) och Lagerlund (2020) använde exempelvis vakuumpumpar för att evakuera luft ur jordprov innan testning skedde. Chapuis (2012) påtalade att om även det vatten som används vid provning är avluftat förenklas vattenmättningsproceduren.

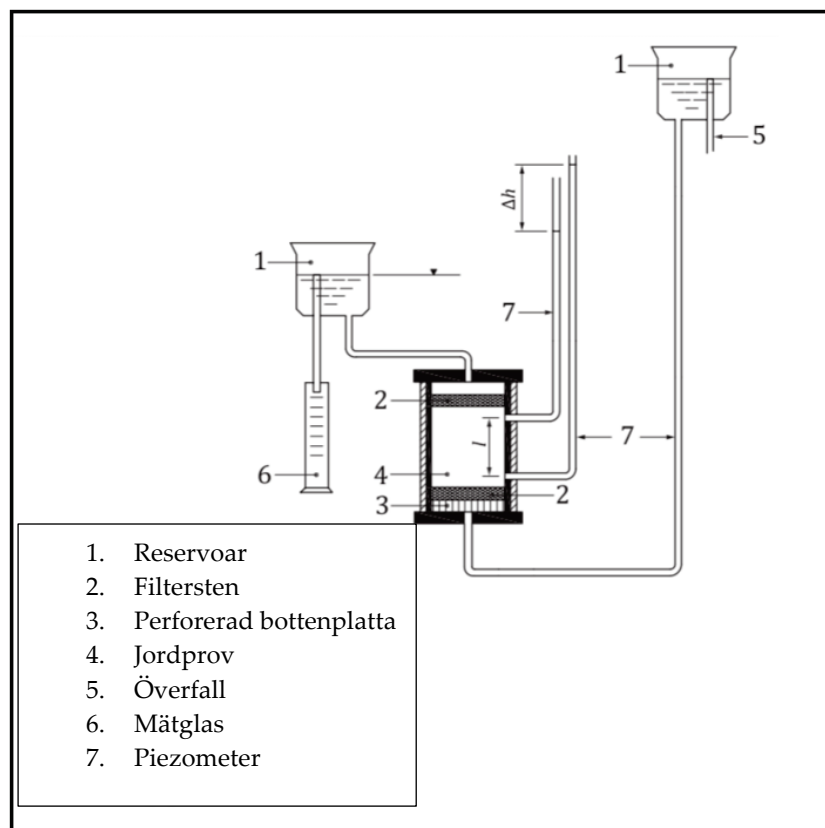
2.2 RÖRPERMEAMETER

Rörpermeameteren är den vanligaste utrustningen för att bestämma hydraulisk konduktivitet i vattenmättade jordmaterial, David Suits et al. (2005); Koozmishi och Palassi (2018); Luo et al. (2020). Rörpermeameteren består av en styv cylinder i vilken ett jordmaterial placeras mellan två filterzoner, Figur 8. Filterzonernas hydrauliska konduktivitet ska överstiga jordmaterialets så att de ej påverkar mätningen. Innan provning påbörjas måste all luft avlägsnas från jordmaterialet så att det kan vattenmätas.

Enligt Permeabilitetstest (2019) ska innerdiametern på rördiametern vara 4 – 10 gånger större än de största kornen på det jordmaterial som testas, vilket antas minska risk för läckage längs rörpermeameterens kanter. Sidoläckage får större inverkan på provningen ju finkornigare jord som provas. Om sidoläckage sker ökar flödet skenbart genom jordmaterialet under provningen. Den

hydrauliska konduktiviteten kommer då att överskattas. För grovkorniga jordmaterial som grus och sten påverkar sidoläckage resultatet minimalt.

Exempel på provning av grovkorniga jordmaterial som testats med rörpermeameter har utförts av Siddiqua et al. (2011) stenfyllning med sortering 10 – 150 mm, Benamar et al. (2019) jordmaterial med sortering 0 – 50 mm och Paiva et al. (2015) samt Tennakoon et al. (2012) med järnvägsballast.



Figur 8. Principskiss för rörpermeameter, Permeabilitetstestning (2019).

3 Material och Metoder

3.1 MATERIAL

De jordmaterial som testats inom denna rapport var mineraljordar av varierande storlekar med användningsområde inom fyllningsdammar såsom filter och stödfyllningar. Deras sortering, rangordnat från det finkornigaste jordmaterialet (0/16 mm) till det grovkornigaste (125/250 mm), samt användning presenteras i Tabell 2.

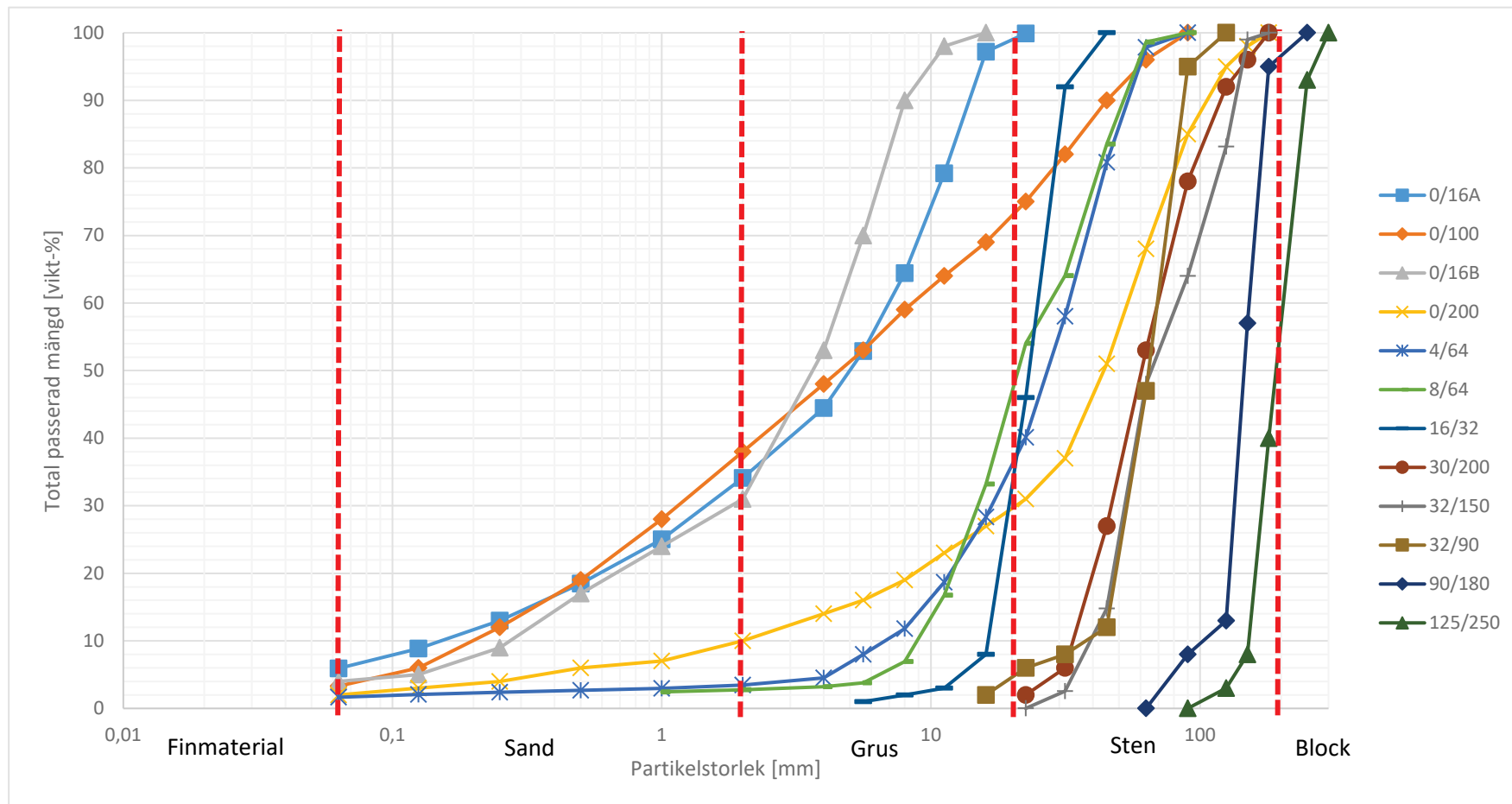
Tabell 2. Jordmaterial testade inom rapporten

Sortering [mm]	d_{10} [mm]	Benämning
0/16A ¹	0,12	Finfilter, krossprodukt
0/100	0,17	Stödfyllning, naturprodukt
0/16B ¹	0,26	Finfilter, krossprodukt
0/200	2	Stödfyllning, krossprodukt
4/64	7	Grovfilter, krossprodukt
8/64	11,2	Grovfilter, krossprodukt
16/32	17	Makadamfyllning, krossprodukt
30/200	33	Stödfyllning, krossprodukt
32/150	40	Stödfyllning, krossprodukt
32/90 ²	40	Rundade stenar, Naturmaterial
90/180 ²	105	Rundade stenar, Naturmaterial
125/250 ²	160	Rundade stenar, Naturmaterial

1. Två olika 0/16 jordmaterial.
2. Siktning ej utförd. Dessa materials kornkurvor uppskattades från manuella mätningar av stenstorlekar efter neddelning.

Samtliga jordmaterials kornkurvor visas i Figur 9. Ingående jordar har stor spridning i egenskaper och består av både krossprodukter (kantiga partiklar) och naturmaterial (rundade partiklar). Siktning utfördes av respektive leverantör av jordmaterial.

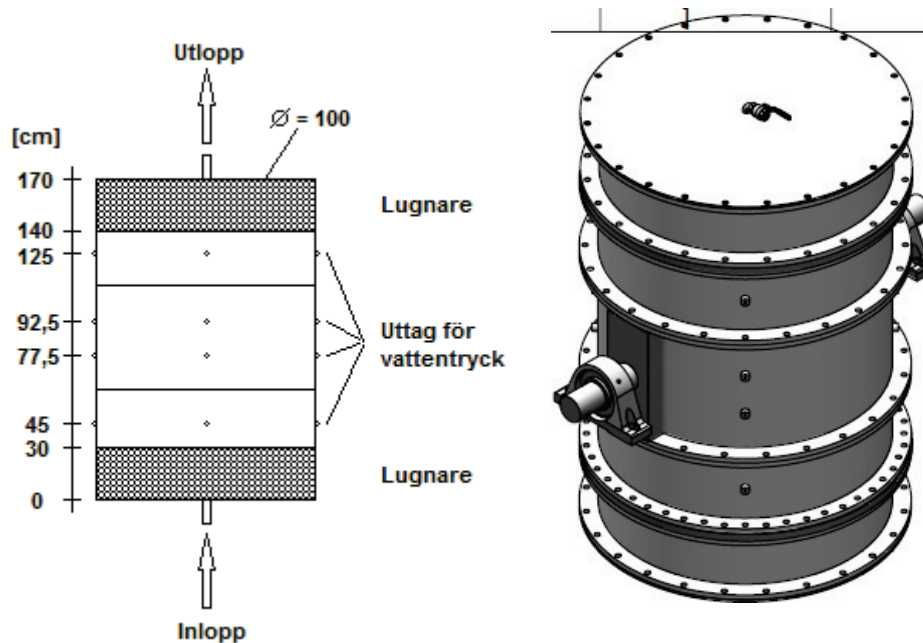
En mer noggrann beskrivning av jordmaterialen följer i avsnitt 4. Framtagning av geotekniska och hydrauliska egenskaper beskrivs i avsnitt 3.2.4 och avsnitt 3.2.5.



Figur 9. Samtliga kornfördelningar på testade jordmaterial.

3.2 PERMEAMETERNS UTFORMNING

Den permeameter som användes i denna studie var av typen rörpermeameter och dess uppbyggnad visas i Figur 10.



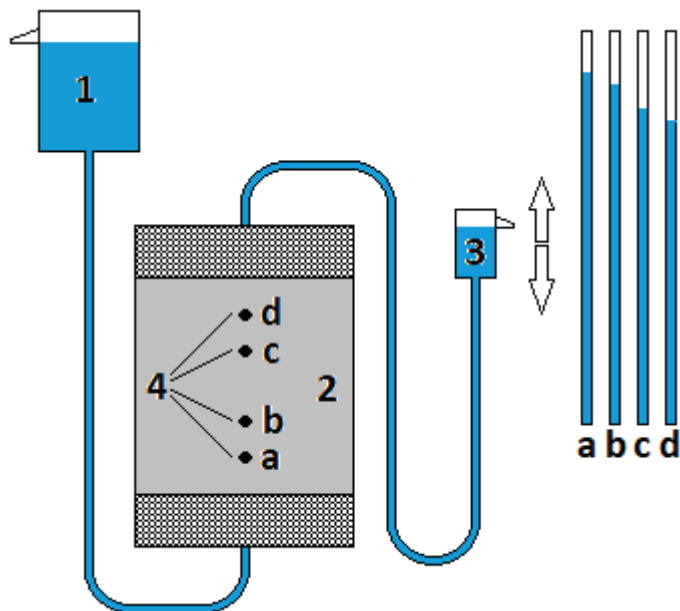
Figur 10. Permeameters dimensioner, uppbyggnad och flödesriktning. Mått i cm.

Permeameteren består av rostfritt stål med godstjockleken 10 mm och har en innerdiameter på 1 000 mm. I toppen och botten består permeameteren av två 300 mm breda "lugnare" fyllda med golfbollar för att fördela inkommande/utgående vatten på hela jordmaterialets tvärsnitt. För att separera jordmaterialet som testas från lugnarna finns en 30 mm bred övergångszon av stål perforerad över hela ytan med ca 10 mm breda hålrum. Precis ovanpå denna zon (in mot jordmaterialet) ligger ett finmaskigt nät med c/c 1 mm. Höjden på jordprovet är 1 100 mm. Centralt på permeameters utsida finns två hjullager som möjliggör rotation av permeameteren vilket underlättar ilastning vid kompaktering samt urlastning av jordmaterial efter slutfört försök. Slangar vid in och utlopp har en diameter på 32 mm.

En schematisk bild av hela systemet visas i Figur 11. Inloppet i botten på permeameteren är sammankopplad med en höghöjdstank eller en pump (1). Om höghöjdstank utnyttjas tillförs alltid mer vatten än vad som kan rinna igenom jordmaterialet. Genom att överskottsvattnet rinner över ett bräddavlopp kan ett konstant vattentryck erhållas genom hela provningen. Höghöjdstanken används framförallt då det jordmaterial som provas är tätt. Då grövre jordmaterial testas används pump.

Vattnet passerar genom permeameteren (2) nerifrån-och-upp eftersom detta underlättar avluftning. Från permeameters ovansida leds vattnet till ett utlopp som kan justeras i nivå (3). Genom att höja/sänka utloppet (3) kan gradienten

genom jordmaterialet ändras. Vattenflödet vid utloppet insamlas och mäts med hink/klocka/våg då jordmaterialet är tätt. Då grovkornigare jordmaterial testas mäts passerad mängd vatten med en flödesmätare.



Figur 11. Schematisk skiss över permeameteren.

Vattentrycket över jordmaterialet mäts via fyra uttag (4) vars uttag är placerade utmed permeameterens sida. De fyra uttagen leder via slangar (ej inritade) till varsitt mätrör (*a*, *b*, *c*, *d*) där vattentrycknivån i jordprovet kan avläsas. I det understa (*a*) respektive översta (*d*) mätröret är flottörer installerade som kan avläsa vattentrycknivån med en noggrannhet om 0,1 mm, se Figur 12. Differensen i vattentryck mellan mätrör *a* och *d* dividerat med avståndet mellan uttagen *a* och *d* ger provningens hydrauliska gradient. Från början av provningarna mättes nivåer i mätrör manuellt men sedan 2021 är flottörer installerade i mätrör *a* och *d* som kan mäta nivåskillnader med en noggrannhet på 0,1 mm. Flottörerna är kopplade till en dator som loggar samtliga värden under hela provningsförloppet.



Figur 12. Mätrör för avläsning av tryckskillnader över provet. Uttag för slangar inkopplade till mätrören visas i Figur 13.

Vanligen vid bestämning av hydraulisk konduktivitet i täta jordmaterial likställs tryckförlust över provet med skillnaden i nivå mellan in- och utlopp av vattnet (nivå vid 1 – nivå vid 3 enligt Figur 11). Då grovkorniga jordmaterial har ett porsystem med större porer än lugnarnas/slangarnas dimensioner måste mätning av tryckförluster ske över enbart jordprovet. För att möjliggöra detta har fyra hål tagits ut genom permeameters sida på fyra olika nivåer för mätning av vattentryck, se Figur 11. På varje nivå finns ett hål för varje 90° i horisontalplanet, sammanlagt 16 hål totalt för permeameteren.

För varje ny positionering ändras gradienten över provet och därmed även flödet. Av denna anledning måste mätrör vara minst lika långa som det område utloppet justeras mellan. Mätrör i Figur 12 är ca 2 m långa.



Figur 13. Installerade slangar för mätning av vattentryck på fyra olika nivåer i permeameter. Slangarna är kopplade till mätrör enligt Figur 12.

För att säkerställa att vattnets temperatur är konstant under hela provningen är systemet slutet. Detta uppnås genom att det vatten som rinner ut ur permeameter vid punkt 3 hamnar i en stor vattentank. Ur denna vattentank pumpas vatten in i permeameter i punkt 1.

Med hjälp av uppmätta värden på flöde och tryckförlust bestäms hydraulisk konduktivitet.

3.3 PROVBBEREDNING

Initialt görs en bedömning av jordmaterialet för att avgöra om det ska kompakteras eller ej. Generellt sett packas finkorniga material medan grovkorniga ej packas (jämför Figur 14 med Figur 15).

Jordmaterialet hålls vanligtvis ner i permeameter via storsäck och travers, Figur 15. Allt jordmaterial som placeras i permeameter vägs för bestämning av densitet och porositet. Vattenkvot bestäms på jordmaterialet. Om kompaktering ej behövs monteras därefter den övre lugnaren på permeameter. Därefter vattenmätas jordprovet.



Figur 14. Jordmaterial 16/32 mm i permeametern. Kompaktering behövs ej.



Figur 15. Finkornigt jordmaterial från storsäck töms i permeameter. Storsäcken lyfts med travers.

Om jordmaterialet kompakteras hålls jordmaterial ner i permeameter och kompakteras med "padda" i fem lager (pallar), se Figur 15 och Figur 16. Innan kompaktering bestäms jordmaterialets optimala vattenkvot. Därefter justeras

vattenkvoten i jordmaterialet till den optimala så samtliga lager kompakteras så identiskt som möjligt. Behöver vatten tillsätts görs detta i en stor planblandare. I planblandaren vägs material från storsäck upp och vatten tillsätts därefter till jordmaterialets optimala vattenkvot. Är vattenkvot i jordmaterialet vid ankomst för hög bör det läggas ut och torkas till dess att optimal vattenkvot uppnås.



Figur 16. Packning av 0/16 jordmaterial i permeameter med padda.

Efter utförd kompaktering monteras den övre lugnaren på så att jordprovet försluts. Jordprovet är därefter klart att vattenmättas. Mot slutet av vattenmätningen gungas permeameter försiktigt fram och tillbaka så att innesluten luft i permeameter kan ledas ut via det justerbara utloppet.

För att tömma slangarna till mätören på luft används en vakuumpump. Tack vare detta drivs all innesluten luft bort från slangarna så att mätning av vattentrycket i permeameter kan utföras. Mätlangarna kan också lösgöras vid sina infästningar i permeameter för att rensa bort luft och/eller jordpartiklar. Detta görs enkelt tack vare snabbkopplingar vid varje infästning. Efter avluftning av permeameter kan bestämning av hydraulisk konduktivitet påbörjas.

3.4 PROVNINGSGENOMFÖRANDE

När det justerbara utloppet fixerats och flödet/tryckskillnaderna i mätören är konstanta kan mätning påbörjas. Generellt går det mycket fort att uppnå konstant flöde/tryck då grovkorniga material testas (dygn). Ju finkornigare jordmaterial som

testas, desto längre tid kan det ta att både påbörja mätningar (veckor/månader) samt invänta nya trycknivåer i mätrören (dygn/vecka).

Under mätningar för finkornig jord avläses tryckförlust okulärt samtidigt som vattenflöde mäts manuellt med hink/klocka/våg. Proceduren upprepas 5 gånger vid 5 olika flödesfall. Då grovkornig jord provas loggas vattenflödet genom permeametern och tryckförlusten över jordmaterialet under ca 60 minuter. I likhet med finkornig jord upprepas mätningarna 5 gånger för olika flödesfall.

Tiden för mätning när ny nivå ställts in avgörs av när det nya flödet samt när vattennivåerna i mätrören stabiliserats. Vid varje mätning mäts även vattnets temperatur då vattnets viskositet är beroende av denna.

Efter provning dräneras permeameter och den övre lugnaren lyfts av varefter materialet tippas ut ur permeametern och körs bort, Figur 17.



Figur 17. Tömning av permeameter efter utförd provning.

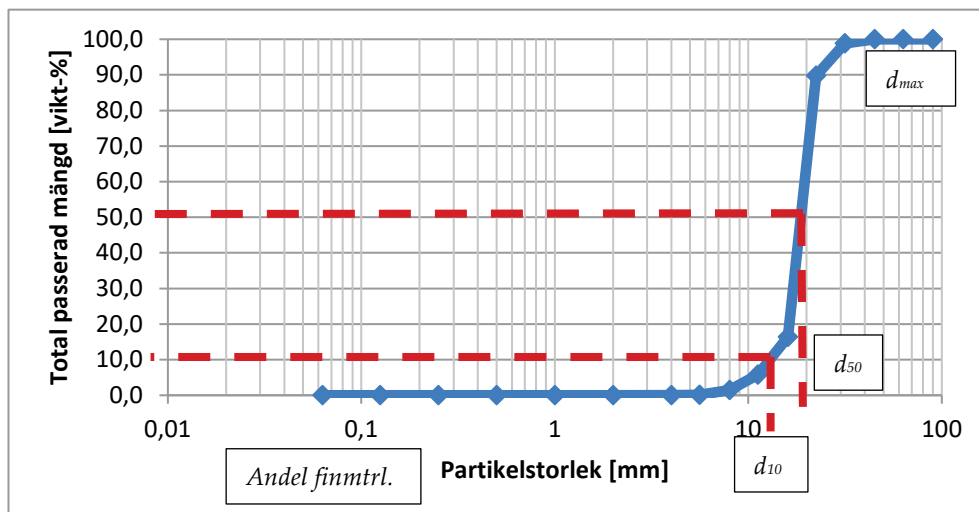
3.5 GEOTEKNISKA EGENSKAPER

Vid uppfyllning av permeameter vägs jordmaterialet. Dess korndensitet bestäms separat med en pyknometer. Då total massa jord, korndensitet samt permeameters volym är känd kan provets densitet och porositet/portal bestämmas. Beteckningar i Tabell 3.

Tabell 3. Jordmaterialens geotekniska egenskaper.

Parameter	Beteckning	Ekvation
Massa material	m_{tot} [kg]	
Volym permeameter	v_{tot} [0,859 m ³]	
Skrymdensitet	ρ_{tot} [kg/m ³]	m_{tot}/v_{tot}
Fukthalt	u [%]	m_w/m_{tot}
Massa vatten totalt	m_{wtot} [kg]	$m_{tot} * u$
Massa solider	m_s [kg]	$m_{tot} - m_{wtot}$
Vattenkvot	w [%]	m_w/m_s
Torrdensitet	ρ_{torr} [kg/m ³]	m_s/v_{tot}
Kompaktdensitet	ρ_s [kg/m ³]	m_s/v_s
Volym solider	v_s [m ³]	m_s/ρ_s
Volym porer	v_p [m ³]	$v_{tot} - v_s$
Porositet	n [-]	v_p/v_{tot}
Portal	e [-]	v_p/v_s
Massa vatten (om mättat)	m_w [kg]	$v_p * \rho_w$
Vattenmättad densitet	ρ_{sat} [kg/m ³]	$(m_s + m_w)/v_{tot}$

För jordmaterialets kornkurva bestäms d_{10} , d_{50} , d_{60} , d_{max} och andel finmaterial (finare än 0,063 mm), Figur 18. d_{10} , d_{50} och d_{60} är de mått på jordmaterialets partikelstorlek i mm som är större än de finaste 10, 50 och 60 vikt % av jordmaterialets kornkurva (Figur 18 är d_{10} ca 13 mm och d_{50} ca 19 mm). d_{max} är maximal storlek i jordmaterialet och andel finmaterial är den andel i vikt % av jordmaterialet som är mindre än 0,063 mm. Enligt exempel i Figur 18 är dessa värden 32 mm respektive 0 %.



Figur 18. Exempel på kornkurva för jordmaterial med markerade d_{10} , d_{50} och d_{max} .

3.6 BESTÄMNING AV HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Jordmaterials hydrauliska konduktivitet beräknas med hjälp av Darcys ekvation [3]. Darcy fungerar under laminära vattenmättade förhållanden. Vid laminär strömning följer vattnets partiklar parallella linjer utan att blandas. För jordmaterial där turbulens misstänks [8], beräknas hydraulisk konduktivitet enligt Forchheimer, ekvation [11, 12, 13 och 14]. Med bakgrund av de Re – tal som presenterats i litteraturen beräknas de jordmaterial som testas med $Re > 75$ även med Forchheimer som komplement till Darcy.

4 Resultat

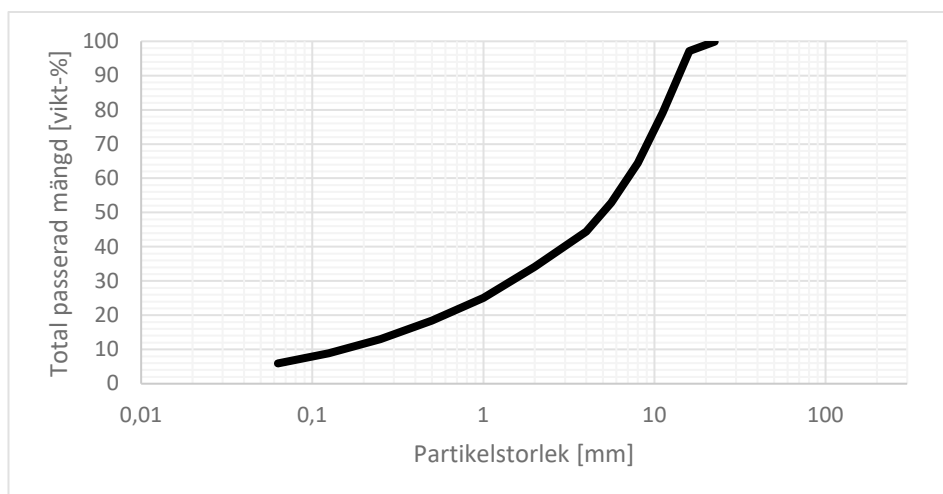
Resultat presenteras för de finkorniga materialen först och därefter de grovkorniga, se Tabell 4. I slutet av detta avsnitt presenteras samtliga resultat i en gemensam tabell. Tyvärr delges ingen detaljerad information från vilka anläggningar jordmaterialen ingår/ingått i på grund av sekretess.

Tabell 4. Sammanställning av de jordmaterial som testats. Sortering utifrån minsta d_{10} till det högsta.

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

1. Ska/har använts i nyproduktion av fyllnings-/gruvdammar i närtid.
2. Upptaget från befintlig, äldre fyllningsdamms nedströms stödfyllning.
3. Kärnkraftsindustrin.
4. Framtaget endast för dessa laborationer.

4.1 0/16A FINFILTER



Figur 19. Kornkurva för jordmaterial 0/16A.

4.1.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 5. Geotekniska egenskaper för 0/16 Finfilter A.

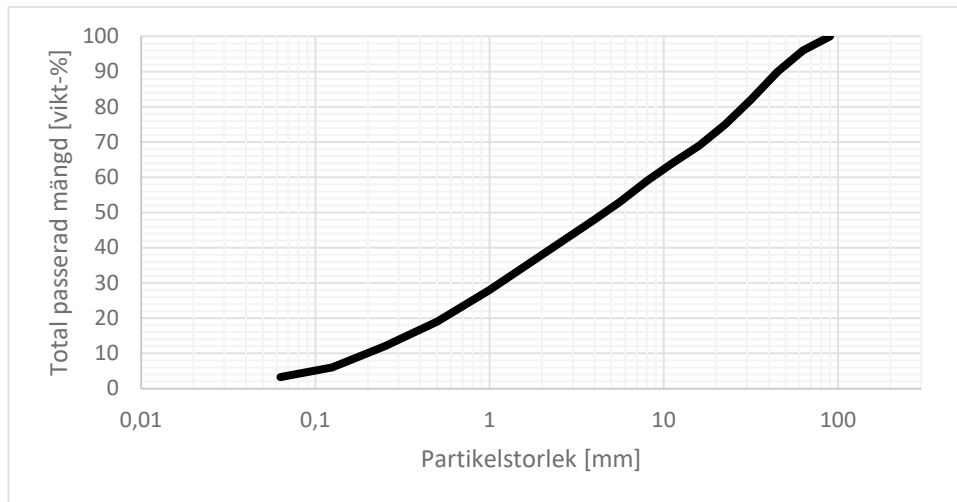
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1729 kg
Torrdensitet	2,01 t/m ³
Porositet	0,24
d_{10}	0,12 mm
d_{50}	2,3 mm
d_{60}	7,0 mm
C_u	58
Andel finmtrl.	5,0 %
d_{max}	23 mm

4.1.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 6. Hydrauliska egenskaper vid testning av 0/16A Finfilter.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	0,75 l/min
Porvattenhastighet	6,68x10 ⁻⁵ m/s
Hyd.Gradient	0,53
Reynolds tal	0,2 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	4,9x10 ⁻⁵ m/s

4.2 0/100 STÖDFYLLNING



Figur 20. Kornkurva för jordmaterial 0/100.

4.2.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 7. Geotekniska egenskaper för 0/100 Stödfyllning.

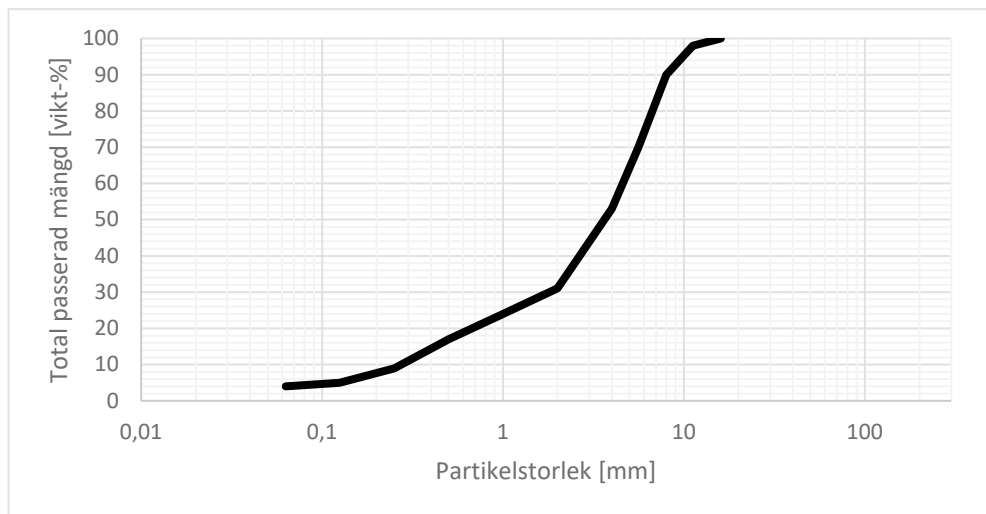
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1881 kg
Torrdensitet	2,19 t/m ³
Porositet	0,18
d_{10}	0,17 mm
d_{50}	5,4 mm
d_{60}	8,3 mm
C_u	49
Andel finmtrl.	3,5 %
d_{max}	125 mm

4.2.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 8. Hydrauliska egenskaper vid testning av 0/100 Stödfyllning.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	0,013 l/min
Porvattenhastighet	1,54x10 ⁻⁶ m/s
Hyd.Gradient	1,13
Reynolds tal	0,01 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	2,4x10 ⁻⁷ m/s

4.3 0/16B FINFILTER



Figur 21. Kornkurva för jordmaterial 0/16B.

4.3.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 9. Geotekniska egenskaper för 0/16B Finfilter.

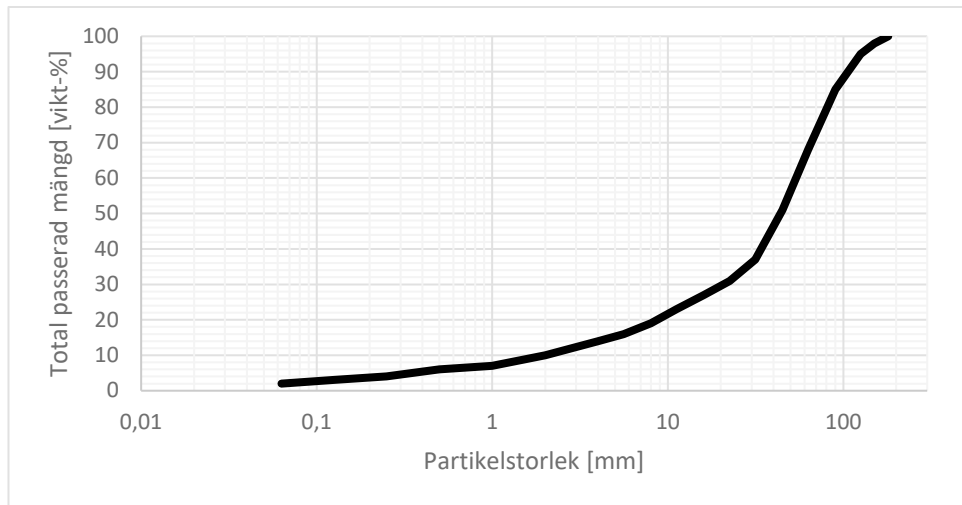
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1676 kg
Torrdensitet	1,95 t/m ³
Porositet	0,26
d_{10}	0,26 mm
d_{50}	3,7 mm
d_{60}	4,4 mm
C_u	17
Andel finmtrl.	3 %
d_{max}	16 mm

4.3.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 10. Hydrauliska egenskaper vid testning av 0/16B Finfilter.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	7,6 l/min
Porvattenhastighet	$6,30 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	0,32
Reynolds tal	2,3 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	$5,1 \times 10^{-4}$ m/s

4.4 0/200 STÖDFYLLNING



Figur 22. Kornkurva för jordmaterial 0/200.

4.4.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 11. Geotekniska egenskaper för 0/200 Stödfyllning.

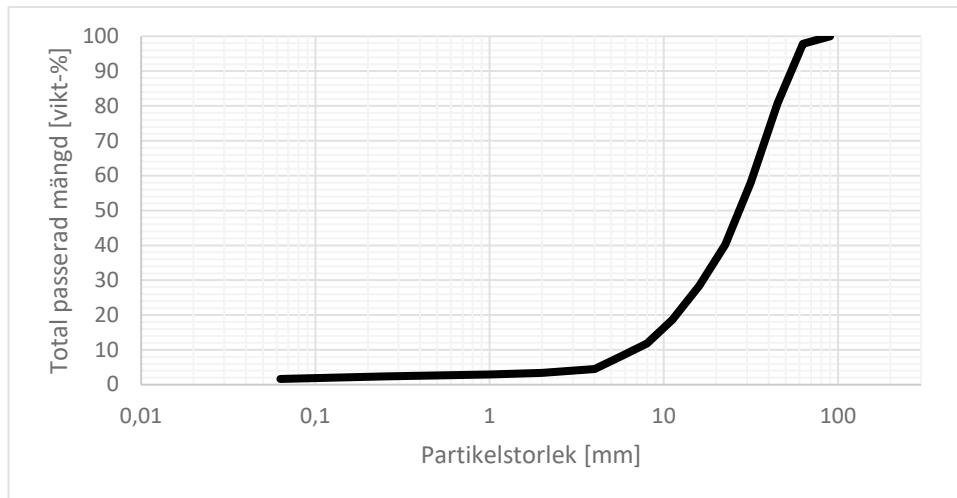
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1526 kg
Torrdensitet	1,78 t/m ³
Porositet	0,33
d_{10}	2,0 mm
d_{50}	45 mm
d_{60}	80 mm
C_u	40
Andel finmtrl.	2 %
d_{max}	180 mm

4.4.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 12. Hydrauliska egenskaper vid testning av 0/200 Stödfyllning.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	33,3 l/min
Porvattenhastighet	$2,2 \times 10^{-3}$ m/s
Hyd.Gradient	$1,4 \times 10^{-3}$ m/s
Reynolds tal	100 (Laminärt/Turbulent)
Hyd.Kond Darcy	0,5 m/s
Hyd.Kond (Ergun, 1952)	1,3 m/s
Hyd.Kond (Kovacs, 1981)	1,1 m/s
Hyd.Kond (Kadlec och Knight 1996)	0,5 m/s
Hyd.Kond Turbulens Medel	1,0 m/s

4.5 4/64 GROVFILTER



Figur 23. Kornkurva för jordmaterial 4/64.

4.5.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 13. Geotekniska egenskaper för 4/64 Grovfilter.

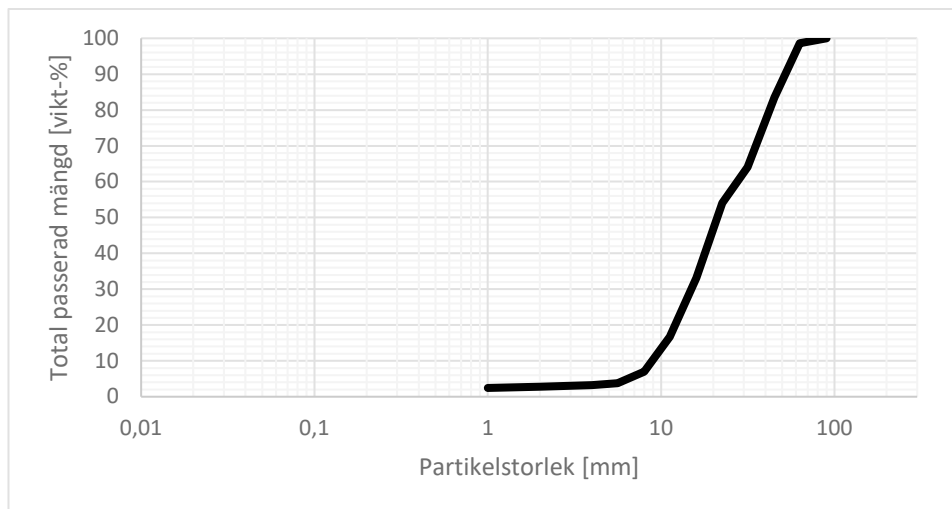
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1344 kg
Torrdensitet	1,56 t/m ³
Porositet	0,41
d_{10}	7,0 mm
d_{50}	26 mm
d_{60}	31 mm
C_u	4,4
Andel finmtrl.	2 %
d_{max}	90 mm

4.5.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 14. Hydrauliska egenskaper vid testning av 4/64 Grovfilter.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	29,5 l/min
Porvattenhastighet	1,5x10 ⁻³ m/s
Hyd.Gradient	6,1x10 ⁻⁴
Reynolds tal	40 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	1,7 m/s

4.6 8/64 GROVFILTER



Figur 24. Kornkurva för jordmaterial 8/64.

4.6.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 15. Geotekniska egenskaper för 8/64 Grovfilter.

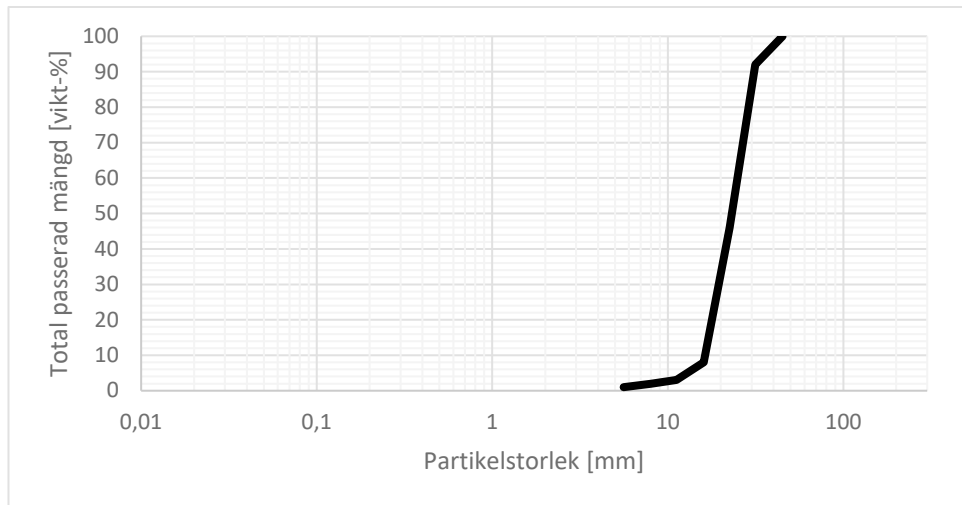
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1283 kg
Torrdensitet	1,49 t/m ³
Porositet	0,44
d_{10}	11 mm
d_{50}	22 mm
d_{60}	25 mm
C_u	2,2
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	90 mm

4.6.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 16. Hydrauliska egenskaper vid testning av 8/64 Grovfilter.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	13,8 l/min
Porvattenhastighet	$6,7 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$1,7 \times 10^{-3}$
Reynolds tal	15 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	0,17 m/s

4.7 16/32 MAKADAMFYLLNING



Figur 25. Kornkurva för jordmaterial 16/32.

4.7.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 17. Geotekniska egenskaper för 16/32 Makadamfyllning.

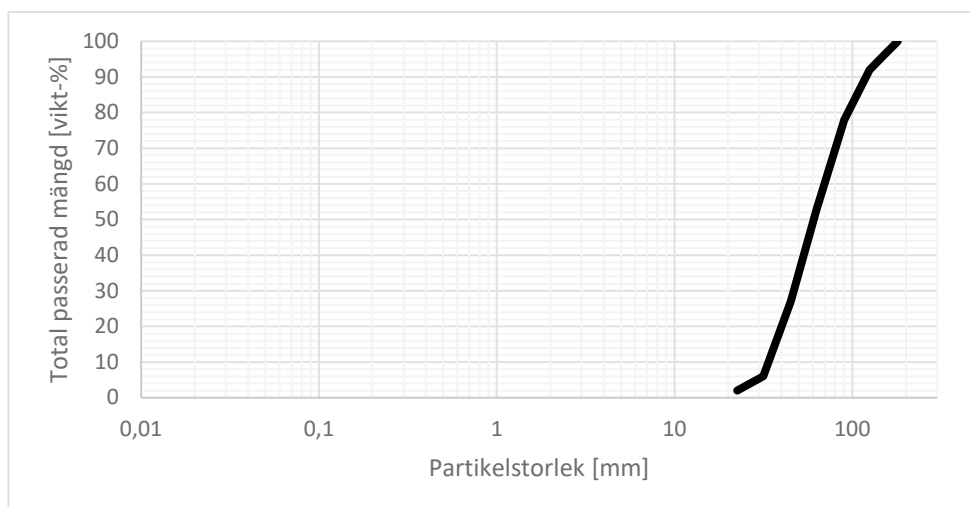
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1236 kg
Torrdensitet	1,44 t/m ³
Porositet	0,46
d_{10}	17 mm
d_{50}	25 mm
d_{60}	23 mm
C_u	1,4
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	45 mm

4.7.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 18. Hydrauliska egenskaper vid testning av 16/32 Makadamfyllning.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	19,6 l/min
Porvattenhastighet	$9,3 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$1,9 \times 10^{-3}$
Reynolds tal	23,5 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	0,23 m/s

4.8 30/200 STÖDFYLLNING



Figur 26. Kornkurva för jordmaterial 30/200.

4.8.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 19. Geotekniska egenskaper för 30/200 Stödfyllning.

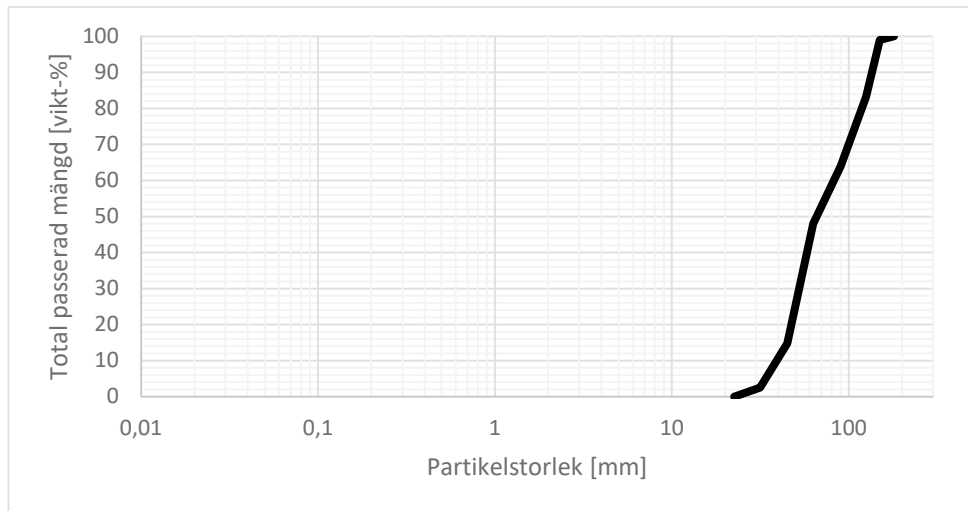
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1346 kg
Torrdensitet	1,57 t/m ³
Porositet	0,41
d_{10}	33 mm
d_{50}	60 mm
d_{60}	70 mm
C_u	2,1
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	180 mm

4.8.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 20. Hydrauliska egenskaper vid testning av 30/200 Stödfyllning.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	34,1 l/min
Porvattenhastighet	6,8x10 ⁻⁴ m/s
Hyd.Gradient	4,0x10 ⁻⁴
Reynolds tal	41 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	1,9 m/s

4.9 32/150 STÖDFYLLNING



Figur 27. Kornkurva för jordmaterial 32/150.

4.9.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 21. Geotekniska egenskaper för 32/150 Stödfyllning.

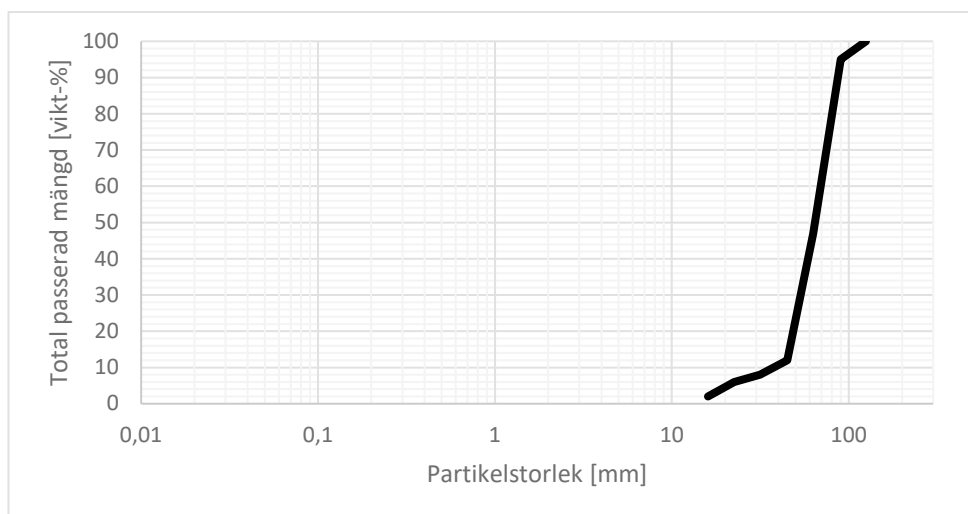
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1275 kg
Torrdensitet	1,48 t/m ³
Porositet	0,44
d_{10}	40 mm
d_{50}	64 mm
d_{60}	80 mm
C_u	2,0
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	190 mm

4.9.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 22. Hydrauliska egenskaper vid testning av 32/150 Stödfyllning.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	14,1 l/min
Porvattenhastighet	$6,9 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$1,3 \times 10^{-3}$
Reynolds tal	44 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	0,24 m/s

4.10 32/90 NATURMATERIAL



Figur 28. Kornkurva för jordmaterial 32/90.

4.10.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 23. Geotekniska egenskaper för 32/90 Naturmaterial.

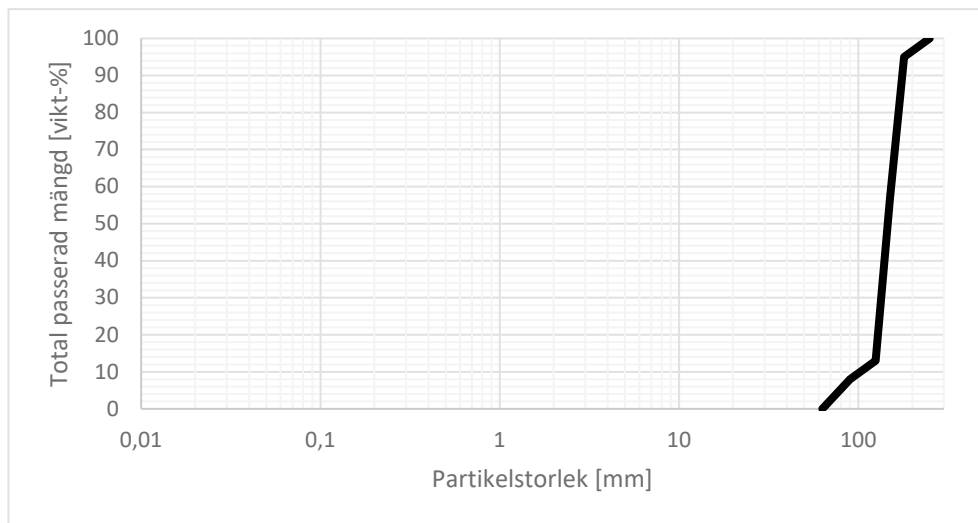
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1419 kg
Torrdensitet	1,65 t/m ³
Porositet	0,38
d_{10}	40 mm
d_{50}	70 mm
d_{60}	70 mm
C_u	1,8
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	90 mm

4.10.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 24. Hydrauliska egenskaper vid testning av 32/90 Naturmaterial.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	10,9 l/min
Porvattenhastighet	$6,1 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$1,8 \times 10^{-3}$
Reynolds tal	43 (Laminärt)
Hyd.Kond Darcy	0,13 m/s

4.11 90/180 NATURMATERIAL



Figur 29. Kornkurva för jordmaterial 90/180.

4.11.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 25. Geotekniska egenskaper för 90/180 Naturmaterial.

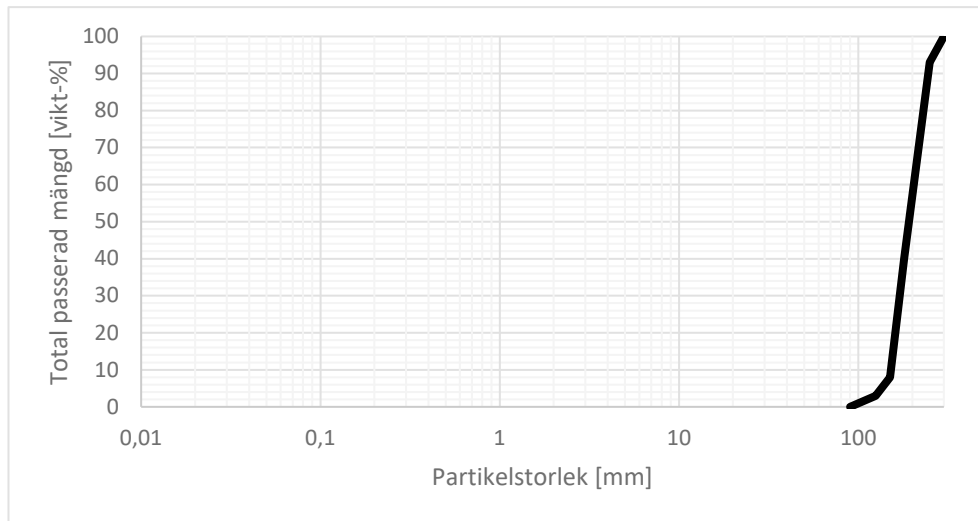
Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1279 kg
Torrdensitet	1,49 t/m ³
Porositet	0,44
d_{10}	105 mm
d_{50}	130 mm
d_{60}	140 mm
C_u	1,3
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	180 mm

4.11.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 26. Hydrauliska egenskaper vid testning av 90/180 Naturmaterial.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	16,2 l/min
Porvattenhastighet	$7,9 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$8,8 \times 10^{-4}$
Reynolds tal	103 (Laminärt/Turbulent)
Hyd Kond Darcy	0,39 m/s
Hyd.Kond (Ergun, 1952)	44 m/s
Hyd.Kond (Kovacs, 1981)	36 m/s
Hyd.Kond (Kadlec och Knight 1996)	17 m/s
Hyd.Kond Turbulens Medel	32 m/s

4.12 125/250 NATURMATERIAL



Figur 30. Kornkurva för jordmaterial 125/250.

4.12.1 Geotekniska egenskaper

Tabell 27. Geotekniska egenskaper för 125/250 Naturmaterial.

Egenskap	Resultat
Massa jordmtrl.	1203 kg
Torrdensitet	1,40 t/m ³
Porositet	0,47
d_{10}	160 mm
d_{50}	200 mm
d_{60}	210 mm
C_u	1,3
Andel finmtrl.	0 %
d_{max}	250 mm

4.12.2 Hydrauliska egenskaper

Tabell 28. Hydrauliska egenskaper vid testning av 125/250 Naturmaterial.

Egenskap	Resultat
Genomsnittligt flöde	15,2 l/min
Porvattenhastighet	$7,0 \times 10^{-4}$ m/s
Hyd.Gradient	$6,3 \times 10^{-4}$
Reynolds tal	140 (Laminärt/Turbulent)
Hyd Kond Darcy	0,52 m/s
Hyd.Kond (Ergun, 1952)	116 m/s
Hyd.Kond (Kovacs, 1981)	92 m/s
Hyd.Kond (Kadlec och Knight 1996)	51 m/s
Hyd.Kond Turbulens Medel	86 m/s

5 Diskussion

5.1 RESULTATENS TILLFÖRLITLIGHET

Bestämning av 12 olika materials hydrauliska konduktivitet har utförts mellan 2017 och 2021. Eftersom utrustningen gradvis uppdaterats med åren kan man generellt säga att ju senare i tid respektive provning genomförts desto "säkrare" är resultaten, Tabell 29. Dock gäller detta ej de tre tätaste materialen (testning nummer 5, 4, 6).

Tabell 29. Sammanfattning av resultat inklusive årtal för respektive provnings genomförande.

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

Då permeameteren togs i drift var tanken att man skulle mäta hydraulisk konduktivitet i morän utan att sortera ur större stenar. Syftet med detta var att studera om den hydrauliska konduktiviteten då skiljde sig jämfört med jordprover på samma morän då större stenar sorterats ut. Av denna anledning förväntades stora tryckfall över proven som enkelt kunde mätas manuellt. Provning 1 – 9 (2017 – 2020) mättes manuellt medan mätning 10 – 12 (2021) mättes automatiserat.

För att undvika turbulenta strömningsförhållanden hölls flödena vid samtlig provning låg (10 – 30 l/min). Om hastigheten på det passerande vattnet hålls låg och det jordmaterial som testas är grovkornigt blir tryckförlusterna över provet mycket låga och därmed svåra att mäta noggrant. Tätare prover ger större tryckförluster och därmed enklare att mäta. Flödena har vid samtliga mätningar kunnat mätas med mycket god precision.

5.1.1 Manuella mätningar

Manuella mätningar utfördes på samtliga jordmaterial utom på de med gradering 4/64, 0/200 och 30/200. Mätfel i flöden bedömdes som negligerbara så eventuella fel i den framräknade hydrauliska konduktiviteten härrör endast från mätning av vattentrycknivåer. Mätning av vattentrycknivåer utfördes från början med tumstock från referensnivå (mätning 1 – 5) samt med vinkelhake från en referensnivå (mätning 6 – 9), Figur 31. Mätfel av manuellt uppmätta vattentrycknivåer var uppskattningsvis ca $\pm 0,5$ mm.

Vid mätning med vinkelhake utfördes kompensation för det faktum att skenan med måttbandet avvek $0,11^\circ$ motsols från lodrätt och vinkelhaken avvek $0,19^\circ$ medsols från vågrätt. Dessa fel i vinklarna ökade felen i mätning ju längre ut på vinkelhaken nivåer i rör *a*, *b*, *c* och *d* mättes. I och med denna korrigering orsakade avvikelserna i vinklarna inga fel vid beräkning av den hydrauliska konduktiviteten.



Figur 31. Manuell mätning av trycknivå. Till vänster användes tumstock och till höger vinkelhake.

För de tre finkornigaste jordmaterialen enligt Tabell 29 (0/16A, 0/100, 0/16B) var skillnad i tryckhöjd så pass stor att en feltolkning av tryckhöjd på 0,5 mm hade liten inverkan på resultat, se Tabell 30.

Tabell 30. Mätosäkerheternas inverkan på framräknad hydraulisk konduktivitet vid manuell mätning ($\pm 0,5$ mm).

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

Som man ser i Tabell 30 ökar känsligheten för resultaten desto lägre tryckskillnader som mäts under provningen. Om exempelvis den korrekta trycknivån är 1 mm kommer en tolkad avläsning på 1,5 mm (0,5 mm "för mycket") ge en underskattning av den hydrauliska konduktiviteten på 33 %. En tolkad avläsning däremot på 0,5 mm (0,5 mm "för lite") ger en överskattning av den hydrauliska konduktiviteten på 100 %. Anledningen till dessa känsligheter ligger i Darcys ekvation [7].

$$K = \frac{Ql}{(h_1 - h_2)A} \quad [7]$$

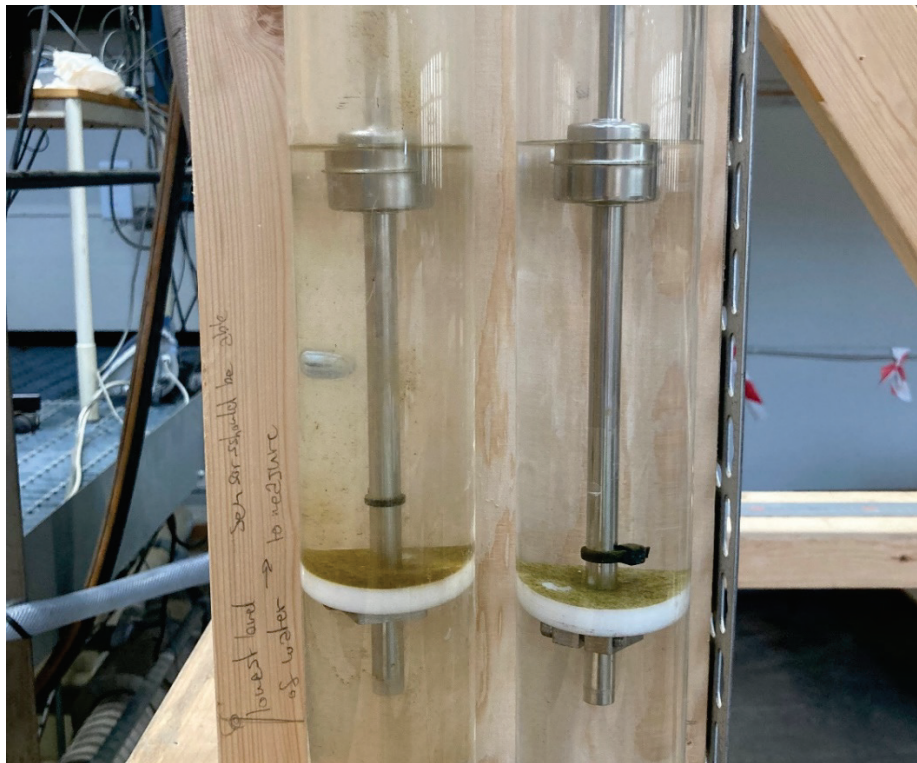
Storleken på K då Q är korrekt mätt, l och A är konstanter beror då endast av storleken på h_1 och h_2 . Då h_1 och h_2 går mot noll går alltså K mot oändligheten (jämför med kurvan från ekvationen $y = 1/x$). Samtliga manuella värden utom mätning 4, 5 och 6 bör därför betecknas som osäkra.

Det ska dock tilläggas att det är författarens erfarenhet vid mätningar i 50 mm permeametrar (ackrediterad provning) att dubbel/trippelprovning av samma jordmaterial kan uppvisa skillnader i resultat på upp till 200 – 300 %.

5.1.2 Automatiserade mätningar

Vid automatiska mätningar av vattentrycken kopplades slangar från mätrör a (understa nivån i permeameter) och mätrör d (översta nivån i permeameter) till två nya mätrör. I två nya rör placerades flottörer som löpte längs en metallstång och mätte därmed tryckskillnaden över jordmaterialet i permeameter vid inlopp/utlopp, Figur 32. Differensen mellan trycken i aktuell figur var ca 1,2 mm.

Differenser ner till ca 0,2 mm accepterades vid automatiserade mätningar. Då differenserna understeg 0,2 mm ansågs eventuella mätfel spela för stor roll på slutresultatet varför dessa mätningar inte togs med i beräkningar.



Figur 32. Flottörer för automatisk mätning av tryckskillnad över 800 mm av jordmaterialet i permeameter.

Mätningar 10, 11 och 12 enligt Tabell 30 utfördes med automatiserad nivå och flödesmätning. Säkerheten i flödesmätningen var identisk med den för manuella mätningar men nivåmätningen av vattentrycken förbättrades från en osäkerhet på $\pm 0,5$ mm till $\pm 0,1$ mm. De nya osäkerheterna jämfört med de manuella visas i Tabell 31.

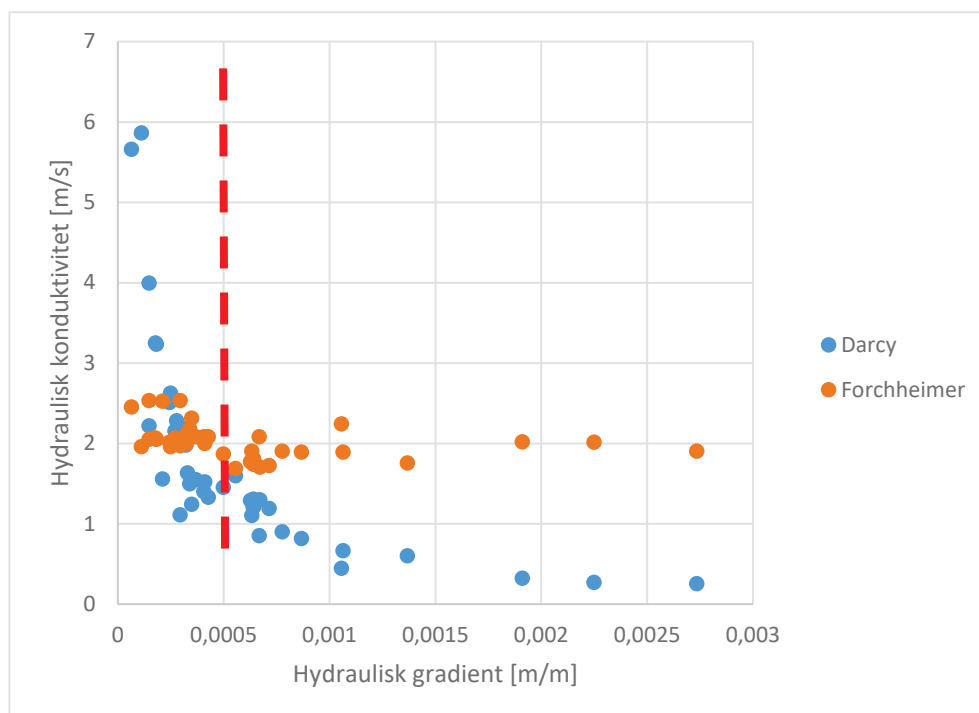
Tabell 31. Mätosäkerheternas inverkan på framräknad hydraulisk konduktivitet vid manuell mätning ($\pm 0,5$ mm) samt automatisk ($\pm 0,1$ mm).

Tryckskillnad [mm]	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

5.1.3 Hydrauliska gradienter och flödesfall

Vattenflödena hölls på låga nivåer för att i så stor utsträckning som möjligt undvika att genomföra testning vid turbulenta förhållanden. Nackdelen med låga flöden blev att tryckskillnader över de testade jordmaterialen blev små och därmed svåra att mäta. Dock "föredrogs" mätfel orsakade av låga tryckfall i stället för tryckfall orsakade av turbulens då det är svårare att kvantifiera mätfel på grund av turbulens.

För jordmaterial 4/64 gjordes en omfattande mätserie eftersom det var för detta material den automatiska mätningen trimmades in. Tack vare detta testades många olika hydrauliska gradienter varför dess inverkan på framräknad hydraulisk konduktivitet kunde påvisas. Vid mycket låga hydrauliska gradienter "stack" den hydrauliska gradienten iväg, Figur 33. I samma figur har även beräkning av hydraulisk konduktivitet enligt Forchheimer lagts in. Enligt Forchheimer blir jordmateriallets hydrauliska konduktivitet oberoende av uppmätta hydrauliska gradienter. Detta har sin förklaring i ekvationerna [11 – 14] eftersom den hydrauliska gradienten där ej beaktas vid framräkning.



Figur 33. Hydraulisk konduktivitet enligt Darcy jämfört med Forchheimer för material 4/64 grovfilter (automatiserade mätningar, mätfel $\pm 0,1$ mm).

Vid en hydraulisk gradient $< 5 \times 10^{-4}$ börjar hydraulisk konduktivitet enligt Darcy att växa exponentiellt. Med anledning av detta bör resultat från provning med gradienter $< 5 \times 10^{-4}$ noggrant beaktas innan resultaten används.

Testning av jordmaterial 4/64 mm utfördes vid $Re = 40 \pm 10$, alltså under laminära förhållanden. De samtliga framräknade värden i beaktande (Figur 33) blir

medelvärde av den hydrauliska konduktiviteten enligt Darcy 1,7 m/s och 2,0 m/s enligt Forchheimer. Exkluderar man värden mätta med hydraulisk gradient $<5 \times 10^{-4}$ får man i stället en hydraulisk gradient enligt Darcy på 0,9 m/s. 0,9 m/s är troligtvis en betydligt mer noggrann bestämning av materialets hydrauliska konduktivitet än 1,7 m/s givet att flödet är laminärt samt att samtliga resultat framräknade med hydrauliska gradienter $<5 \times 10^{-4}$ exkluderats.

Vidare är det värt att notera att vatten leddes in/ut genom permeameter via slangar med innerdiameter 32 mm. I dessa slangar har hastigheten på vatten varit betydligt högre än inne i permeameter under samtliga mätningar. Flöden vid samtliga provningar skedde kring ca 10 – 30 l/minut. Givet dessa värden låg Reynolds tal genom slangar mellan ca 7 000 – 20 000 under provningarna. Alltså förekom turbulens i slangarna under samtliga mätningarna men bara i två fall (troligen) även inne i själva provet. Hur turbulens i slangar påverkade tryckmätningarna inne i själva permeameter är oklart men med stor sannolikhet sänkte det vattenflödet och i och med detta, indirekt, även tryckförlusterna inne i permeameter. För att slangar ej ska inverka på resultatet bör dess tvärsnittsarea vara ca 50 % av permeameters (maximal porositet var 0,47 under provningarna). Detta innebär att nuvarande slangar på 32mm diameter borde bytas ut mot rör med diameter på ca 700 mm.

Slutligen bör nämnas att de två grävsta materialen (90/180 och 125/250), som testades tidigt i labbserien uppvisade en så pass stor skillnad i hydraulisk konduktivitet (Darcy vs Forchheimer) att dessa resultat bör diskuteras. Enligt Darcy blev hydraulisk konduktivitet 0,39 m/s respektive 0,52 m/s. När den hydrauliska konduktiviteten i dessa mätningar i stället beräknades med Forchheimer blev resultatet 32 m/s respektive 86 m/s. Det är författarens åsikt att en ökning på 82 respektive 165 gånger beroende på beräkningssätt är orealistisk. Alltså har resultat från dessa mätningar valts att presenteras framräknade enligt Darcys lag.

5.2 TOLKNING AV RESULTAT MED HÄNSYN TAGEN TILL DISKUSSION

Slutliga resultat utifrån mätningar utförda mellan år 2017 – 2021 visas i Tabell 32. I denna tabell presenteras samtliga bestämda hydrauliska konduktiviteter enligt Darcys lag och mätosäkerheterna vid varje mätning.

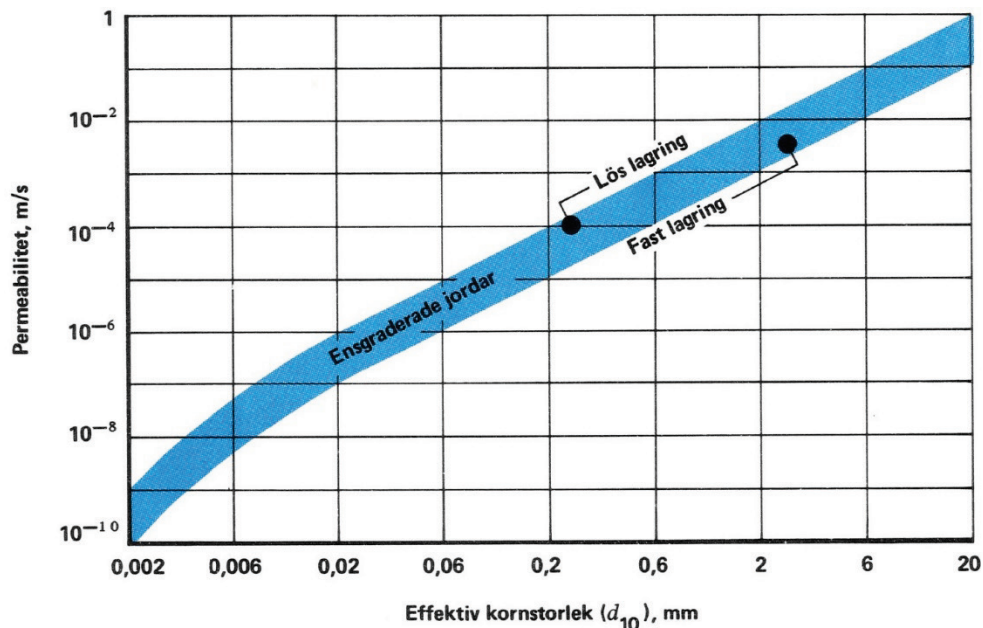
Tabell 32. Slutliga resultat när hänsyn tagits till diskussion. Ändrade resultat jämfört med Tabell 29 är fetmarkerade. Mätosäkerheten är anpassad efter metoden vid respektive mätning

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	$4,9 \times 10^{-5}$	<1
0/100 Stödfyllning	Nr 4, 2019	0,17	0,01	$2,4 \times 10^{-7}$	<1
0/16B Finfilter	Nr 6, 2019	0,26	2,3	$5,1 \times 10^{-4}$	<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

Osäkerheterna vid framräkning av den hydrauliska konduktiviteten ökar för grovkornigare material på grund av de allt minskade hydrauliska gradienterna de för med sig. Låg hydraulisk gradient innebär att mätosäkerheten i metoden för att mäta vattennivåer blir allt mer dominerande. För det grovkornigaste materialet (125/250) mättes tryckförlust över prov till drygt 0,5 mm. Givet mätosäkerhet i denna metod på $\pm 0,5$ mm kan därför den hydrauliska konduktiviteten bli 12 500 % högre (!) än redovisat värde. Denna enorma osäkerhet uppkommer av rent matematiska skäl och betecknas som orimligt hög.

5.3 NYA RESULTAT I RELATION TILL GAMLA

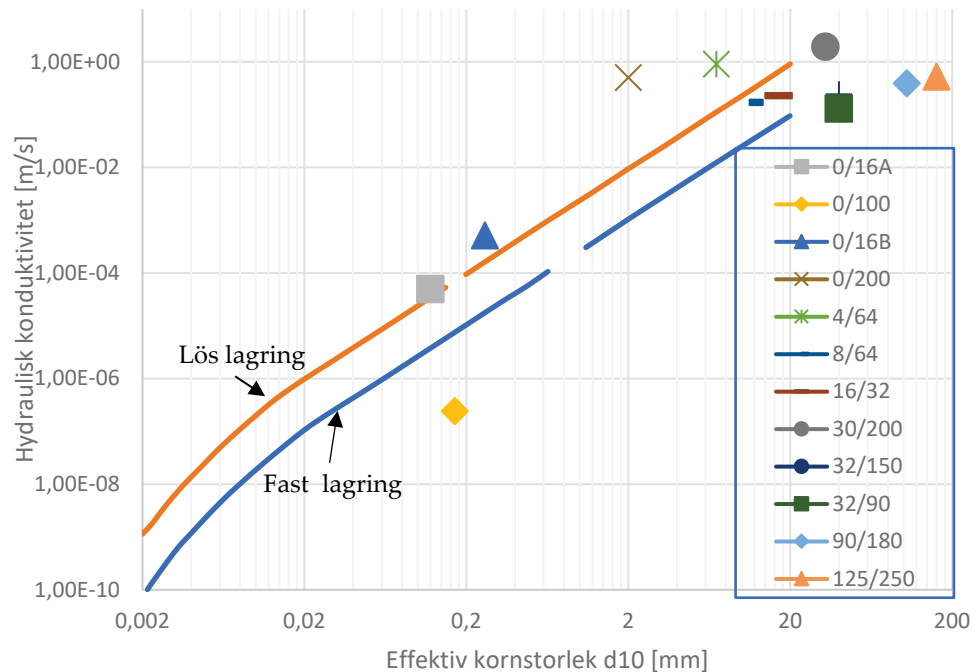
I Vattenfall (1988) på sidan 31 återfinns ett diagram som beskriver ett jordmaterials hydrauliska konduktivitet i relation till dess effektiva kornstorlek, Figur 34. Notera att man i figur felaktigt använder sig av permeabilitet i stället för hydraulisk konduktivitet på y-axelns förklaring.



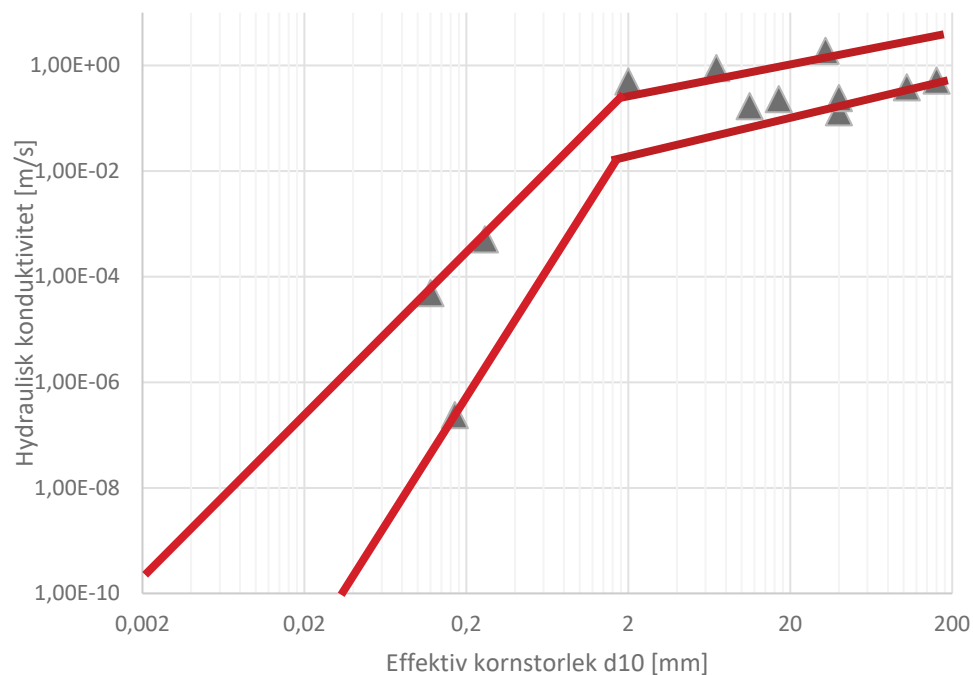
Figur 34. Förhållande mellan hydraulisk konduktivitet och effektiv kornstorlek i ensgraderade jordar. Notera y-axelns benämning "permeabilitet" vilket bör skrivas som hydraulisk konduktivitet. Vattenfall (1988).

I Figur 35 har nya resultat från denna laborationsserie lagts in. Framförallt kompletterar nya resultat den grovkornigare delen av kurvan av förväntade hydrauliska konduktiviteter givet ett jordmaterials d_{10} mått.

En ny approximation på förväntade hydrauliska konduktiviteter i bredgraderade jordmaterial visas i Figur 36. Ju finkornigare ett jordmaterial är desto större roll spelar kompakteringen på materialets uppnådda hydrauliska konduktivitet. Som komplement till värde för 0/100 materialet ($2,4 \times 10^{-7}$ m/s vid porositet 0,18) kan nämnas att då detta material testades opackat blev den hydrauliska konduktiviteten ca 4 400 gånger högre ($1,1 \times 10^{-3}$ m/s vid porositet 0,36). Kompaktering av grovkornigare material som exempelvis material 16/32 gav däremot ingen skillnad alls i bestämd hydraulisk konduktivitet.



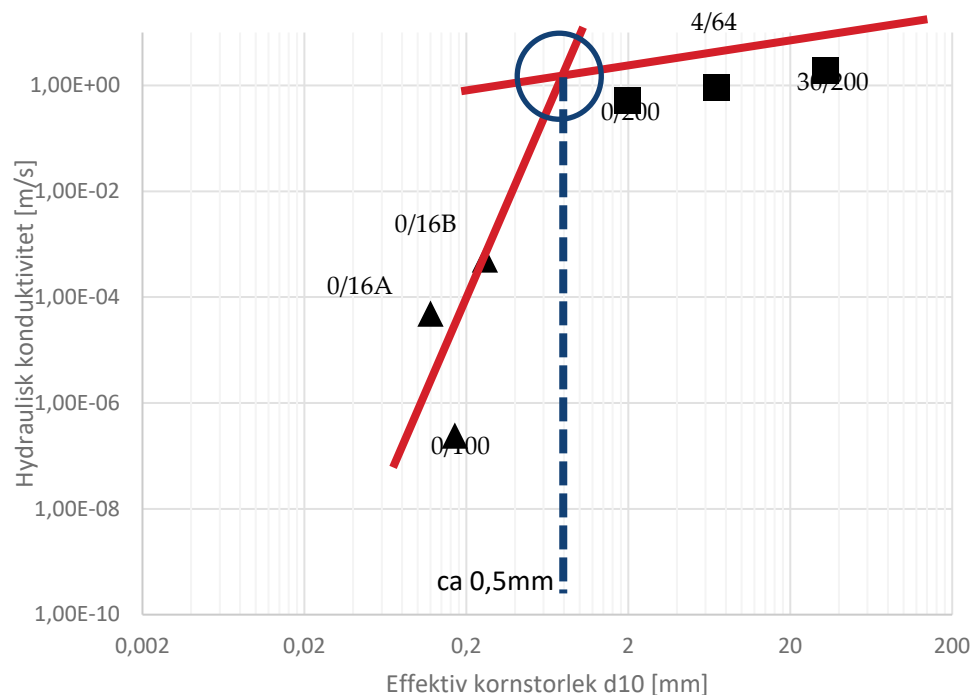
Figur 35. Nya resultat av hydraulisk konduktivitet från utförd laboratoriserie jämfört med resultat från Fagerström och Wiesel (1972) enligt Figur 34. Notera att resultat från Fagerström och Wiesel (1972) är för ensgraderade jordmaterial.



Figur 36. Ny approximation över förväntade hydrauliska konduktiviteter på jordmaterial med avseende på effektiv kornstorlek.

I approximationen som redovisas i Figur 36 hamnar en del resultat under approximeringsområdet. Detta är för att mätningar av de grovkornigaste materialen troligtvis är underskattade. Endast material 0/200, 4/64 och 30/200 (se

Figur 35) mättes med den nya utrustningen varför osäkerheten i dessa värden är betydligt lägre än övriga. Rent logiskt bör provning av material grovkornigare än 30/200 mm ge en högre hydraulisk konduktivitet än just jordmaterial 30/200 mm men samtliga grovkornigare jordmaterial mättes med manuella avläsningar (med större osäkerhet). Av denna anledning är troligen hydraulisk konduktivitet för material 32/150, 30/90, 90/180 och 125/250 underskattad. Sorterar man bort osäkra värden och lägger in endast de säkraste leder detta till Figur 37.



Figur 37. "Säkra" värden utsorterade, d_{10} vs. hydraulisk konduktivitet bestämd enligt Darcy.

Slutligen verkar det som att det finns ett d_{10} område kring 0,5 mm där d_{10} påverkan på den hydrauliska konduktiviteten minskar. Denna gräns är troligen inte lika "skarp" som visas i Figur 37.

I RIDAS (2020) uppskattas den hydrauliska konduktiviteten i grovkorniga jordmaterial baserat på arbete utfört av Solvik (1995). I denna referens tas den hydrauliska konduktiviteten fram enligt följande ekvationer [16 och 17]

$$\text{Laminär strömning: } k_l = \frac{1}{\alpha} \times \frac{n^2}{(1-n)^3} \times \frac{gd_{10}^2}{v} \quad [16]$$

$$\text{Turbulent strömning: } k_t = \frac{1}{\beta} \times \frac{n^3}{(1-n)} \times gd_{10} \quad [17]$$

Där n är materialets porositet, g är gravitationskonstant (m/s), v är vattnets kinematiska viskositet (Pa s), α och β är kornformskoefficienter enligt Tabell 33 och d_{10} är jordmaterialets effektiva kornstorlek (mm).

Tabell 33. Formkoefficienter till ekvation [16 och 17]

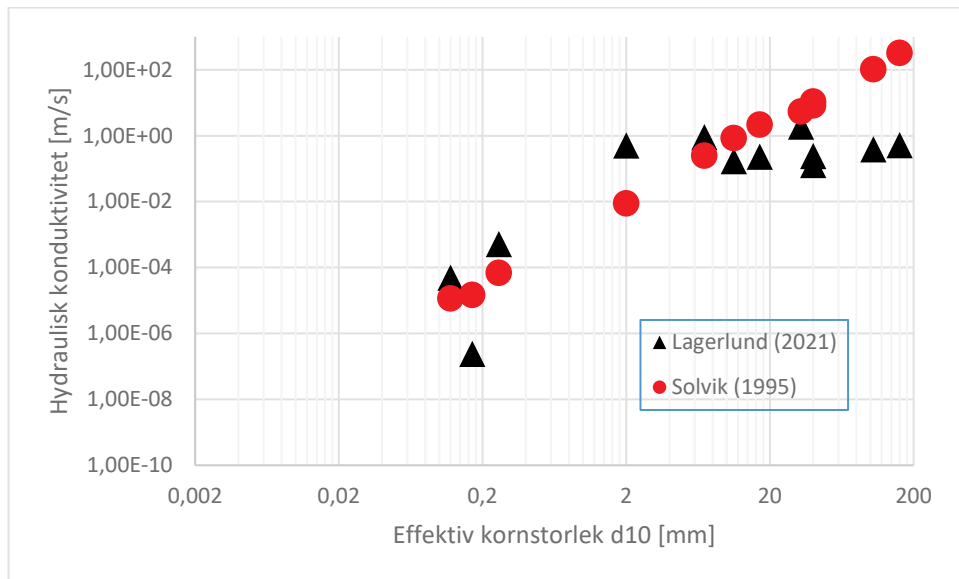
Material	α	β
Kulform	780	1,8
Runda korn ensgraderade	1000	2,8
Sten med runda kanter	1140	3,1
Sten med skarpa kanter	1600	3,6

En jämförelse mellan resultat från Solvik (1995) och genomförd laborationsserie visas i Tabell 34.

Tabell 34. Jämförelse mellan laborativa resultat jämfört med framräkningar enligt Solvik (1995).

Material	Sortering	d_{10} [mm]	Hyd. kond [m/s]	Laminär Hyd.Kond. [m/s]	Turb. Hyd.Kond. [m/s]
				(Solvik 1995)	(Solvik 1995)
0/16A Finfilter	0/16A	0,12	$4,9 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-6}$
0/100 Stödfyllning	0/100	0,17	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-6}$
0/16B Finfilter	0/16B	0,26	$5,1 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$
0/200 Stödfyllning	0/200	2	0,50	$8,9 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$
4/64 Grovfilter	4/64	7	0,90	0,25	$2,2 \times 10^{-3}$
8/64 Grovfilter	8/64	11	0,17	0,85	$4,6 \times 10^{-3}$
16/32 Makadamfyllning	16/32	17	0,23	2,2	$7,7 \times 10^{-3}$
30/200 Stödfyllning	30/200	33	1,9	5,5	$1,1 \times 10^{-2}$
32/150 Stödfyllning	32/150	40	0,24	11	$1,7 \times 10^{-2}$
32/90 Naturmaterial	32/90	40	0,13	8,3	$1,1 \times 10^{-2}$
90/180 Naturmaterial	90/180	105	0,39	105	$5,0 \times 10^{-2}$
125/250 Naturmaterial	125/250	160	0,52	327	0,10

Grafisk presentation av laminär hydraulisk konduktivitet enligt Solvik (1995) jämfört med resultat från utförda mätningar presenteras i Figur 38.



Figur 38. Jämförelse mellan laminära hydrauliska konduktiviteter presenterade i Tabell 34.

Uppskattningarna av den hydrauliska konduktiviteten enligt Solvik (1995) är snarlik med mätresultat för finkornig jord men "drar" iväg för grovkornigare jordmaterial vid laminära förhållanden. Vid turbulenta förhållanden underskattas den hydrauliska konduktiviteten framräknade enligt Solvik (1995). En intressant notis är att framräkning av turbulent hydraulisk konduktivitet enligt Forchheimer ger betydligt högre hydraulisk konduktivitet jämfört med de uppmätta (Tabell 29) medan Solvik (1995) underskattar densamma (Tabell 34).

Ekström et al (2019) nämner antagen hydraulisk konduktivitet på 0,1 – 1,0 m/s (laminär) samt 0,005 – 1 m/s (turbulent) vid riskanalyser. Vid grovgallringen av litteratur till denna rapport framkom ofta värdet 0,1 m/s som den antagna hydrauliska konduktiviteten på grovkorniga jordmaterial vid diverse modelleringar av genomströmningar i fyllningsdammar. 0,1 m/s sammanfaller med den framräknade turbulenta hydrauliska konduktiviteten för de mest grovkorniga jordmaterialen enligt Solvik (1995).

5.4 LUFTPROBLEMATIK

Under testningarna var det inte bara osäkerheter i avläsningar av tryckskillnader som orsakade problem utan även luft i jordens porer. Luften kom inte endast från ilastning av jord i permeameter utan även från det vatten som användes under testningen.

Inför varje provning cirkulerades vatten genom permeameter till dess att flöde/tryckfall var stabila. Då finkornig jord testades kunde denna procedur ta över en månad innan mätning kunde utföras. Vid själva provningen pumpades fortsatt vatten genom provet i ytterligare flera veckor och ibland månader. Givet ett flöde på 20 l/min åtgick varje dygn 28,8 m³ vatten till testningen genom provet. Eftersom vatten innehåller små mängder luft kunde synbara luftbubblor med tiden ackumuleras i rörkrökar, slangar och troligen i de finkorniga jordmaterialen. Detta

ledde ibland till en strypning av vattenflödet. För att minska felaktiga resultat på grund av luftbubblor i rörkrökar/slangar användes mest transparenta slangar så att eventuella luftbubblor kunde lokaliseras och ledas ut ur systemet.

Problemen med luft inne i jordmaterialet minskade betydligt med ökade kornstorlekar men då ökade i stället problematiken med luft i rörkrökar/slangar på grund av högre vattenflöden.

6 Slutsatser

- Sammanlagt 12 olika jordmaterial har testats med avseende på bestämning av hydraulisk konduktivitet. Resultat från dessa mätningar redovisas i Tabell 35. Angivna värden är för vattenmättade, laminära förhållanden.

Tabell 35. Resultat från provningen.

Material	d ₁₀ [mm]	Hyd. kond [m/s]	Mätosäkerhet [%]
0/16A Finfilter	0,12	4,9x10 ⁻⁵	<1
0/100 Stödfyllning	0,17	2,4x10 ⁻⁷	<1
0/16B Finfilter	0,26	5,1x10 ⁻⁴	<1
0/200 Stödfyllning	2	0,50	-7 till + 8
4/64 Grovfilter	7	0,90	-6 till +7
8/64 Grovfilter	11	0,17	-27 till +58
16/32 Makadamfyllning	17	0,23	-25 till +49
30/200 Stödfyllning	33	1,9	-24 till +45
32/150 Stödfyllning	40	0,24	-32 till +93
32/90 Naturmaterial	40	0,13	-26 till +53
90/180 Naturmaterial	105	0,39	-42 till +245
125/250 Naturmaterial	160	0,52	-50 till +12 500

- Rent mättekniskt var det mycket svårt att bestämma den hydrauliska konduktiviteten i grovkorniga jordmaterial eftersom tryckfallen blev så pass små och därmed svårsmätta. För finkorniga jordmaterial, då tryckskillnader blev större, gick det enkelt att mäta korrekt.
- All provning utfördes på samma sätt men mätmetodiken för tryckskillnader utvecklades med tiden. De tidigaste mätningarna (2017 – 2020) utfördes med manuella avläsningar av tryckfall (noggrannhet 0,5 mm) medan senare mätningar (2021) utfördes med automatiserade mätningar (noggrannhet 0,1 mm). Av denna anledning är mätosäkerheterna inte bara beroende av tryckfallens storlekar utan även av mätmetoden i sig.
- Hydraulisk gradient valdes medvetet till att vara så pass låga så att provning skedde med laminära förhållanden ($Re < 75$). På så vis kunde osäkerheterna i resultat enklare kvantifieras. Litteraturen har inga entydiga svar vid vilka Reynolds tal turbulens initieras i jordmaterial. Av denna anledning är samtliga värden på hydraulisk konduktivitet i Tabell 35 framräknad enligt Darcy (laminär strömning). Då hydraulisk

konduktivitet bestäms för turbulenta förhållanden blev värden betydligt högre.

- Avluftning av permeameter/jordmaterialet var viktigt för att kunna utföra mätningar. Avluftning kunde ta flera veckor. Vid testning av grovkornigare jordmaterial kunde luft ackumuleras i rörkrökar/slangar på grund av den stora vattenåtgången vid testning. Denna luft fick ledas ut ur systemet innan provning.
- Den effektiva kornstorleken i ett jordmaterial (d_{10} – måttet) inverkar på den hydrauliska konduktiviteten. Vid låga d_{10} är ändringen i hydraulisk konduktivitet kraftigare än vid högre. Då d_{10} är ca 0,5 mm verkar en brytpunkt finnas där inverkan av d_{10} på den hydrauliska konduktiviteten ändras.
- Hydraulisk konduktivitet i grovkorniga jordmaterial presenterade i denna rapport skiljer sig från antagna värden i RIDAS. Föreliggande rapport presenterade parameterval ger att vägledning enligt RIDAS kan leda till en överdimensionering av exempelvis dammtån.

7 Fortsatt forskning

- Fler bestämningar av hydraulisk konduktivitet bör utföras vid d_{10} kring 0,5 mm för att avgöra var omslaget sker från kraftigt ökad hydraulisk konduktivitet på grund av ökat d_{10} till en flackare ökning. Har Darcys ekvation för bestämning av hydraulisk konduktivitet en övre gräns för jordmaterials grovkornighet vid vilken det linjära förhållandet mellan gradient/hydraulisk konduktivitet ändrar förutsättningar?
- Nedre gräns för hydraulisk gradient då Darcys lag är gällande bör undersökas. Vid riktigt låga hydrauliska gradienter under provning kan resultat av den hydrauliska konduktiviteten enligt Darcys lag bli orimligt hög.
- Utredda hur man kan möjliggöra noggrannare mätning av gradienter $<5 \times 10^{-4}$ vid provning. Mättrör kan exempelvis placeras i vinkel för att på så sätt förlänga mätsträckan och därmed minska mätosäkerhetens inverkan på den framräknade hydrauliska konduktiviteten.
- Kornformens och ytråheternas inverkan på hydraulisk konduktivitet. Friktionen mellan vatten/jordmaterial och läckagevägarnas längd bör bli mindre/kortare då runda korn testas jämfört med flakiga korn med identisk storleksfördelning. Hydraulisk konduktivitet för jord med rundade korn bör därför bli högre jämfört med jord bestående av flakiga korn.
- Med anledning av den förbättrade mätmetodiken bör fler provningar på grovkorniga jordmaterial genomföras för att utöka det statistiska underlaget.
- Mätningar av hydraulisk konduktivitet vid turbulenta förhållanden då denna typ av flöde mer sannolikt uppstår i exempelvis en dammtå vid ett skade-/haveriförlopp.

8 Referenslista

- Bağcı, Ö., Dukhan, N., Özdemir, M. (2014). *Flow Regimes in Packed Beds of Spheres from Pre-Darcy to Turbulent*. *Transp. Porous Media* 104, 501–520.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, New York (1972).
- Benamar, A., Correia dos Santos, R.N., Bennabi, A., Karoui, T. (2019). *Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes*. *Acta Geotech.* 14, 815–823.
- Bernell, L. (1957). *The properties of moraines*. 4th International conference on soil mechanics and foundations engineering, London, vol. 2, pp. 286 – 290.
- Bordier, C., Zimmer, D. (2000). *Drainage equations and non-Darcian modeling in coarse porous media or geosynthetic materials*. *J. Hydrol.* 228(3–4), 174–187.
- Bouwer, H. (1966). *Water resources research*, Fourth Quarter 1966. v. 2 (4), p. 729-738.
- Chapuis, R.P. (2012). *Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review*. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 71, 401–434.
- Chesworth, W., Arbestain, M.C., Macías, F., Spaargaren, O., Mualem, Y., Morel-Seytoux, H.J., Horwath, W.R., Almendros, G., Grossl, P.R., Sparks, D.L., Fairbridge, R.W., Singer, A. (2021). *Conductivity, Hydraulic*. Springer Link. https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/referenceworkentry/10.1007%2F978-1-4020-3995-9_125 [2021-03-10].
- Comiti, J., Saribi, N.E., Montillet, A. (2000). *Experimental characterization of flow regimes in various porous media — 3: limit of Darcy's or creeping flow regime for Newtonian and purely viscous non-Newtonian fluids*. *Chem. Eng. Sci.* 55(15), 3057–3061.
- Dan, H.-C., He, L.-H., Xu, B. (2016). *Experimental Investigation on Non-Darcian Flow in Unbound Graded Aggregate Material of Highway Pavement*. *Transp. Porous Med.* 112, 189–206.
- David Suits, L., Sheahan, T., Yeung, A., Sadek, S. (2005). *Apparatus Induced Error in Hydraulic Conductivity Measurement Using a Lucite® Fixed Wall Permeameter*. *Geotech. Test. J.* 28, 12527.
- Dybbs, A., Edwards, R.V. (1984). *A new look at porous media fluid mechanics. Darcy to turbulent*. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Part of the NATO ASI Series book series (NSSE), Martinus Nijhoff, Dordrecht, vol. 82, pp. 199–256.
- Ekström, I., Ljunggren, M., Nilsson, Å. (2019). *Dimensionerande läckage för fyllningsdammar*. Energiforsk rapport 2019:584.
- Ergun, S. (1952). *Fluid flow through packed columns*. *Chem. Eng. Prog.* 48(2), 89–95.

- Espeby, B. & Gustafsson, J. P. (1998). *Vatten och ämnestransport i den omättade zonen*. Institutionen för anläggning och miljö, Mark och vattenresurser. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.
- Fagerström, H. & Wiesel, C-E. (1972). *Permeabilitet och kapillaritet*. Byggforskningens informationsblad B7:1972.
- Ferdos, F., Wörman, A., Ekström, I. (2015). *Hydraulic conductivity of coarse rockfill used in hydraulic structures*. *Transp Porous Med* 108:367 – 391.
- Forchheimer, P.H. (1901). *Wasserbewegung durch boden*. *Z. Ver. Deutsch. Ing.* 50, 1781–1788.
- Hassanizadeh, S.M., Gray, W.G. (1987). *High velocity flow in porous media*. *Transp. Porous Med.* 2(6), 521–531.
- Hölting, B., Coldewey, W.G. (2019). *Hydrogeology*, 1st ed. 2019. ed, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer Berlin Heidelberg: Imprint: Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jolls, K.R., Hanratty, T.J. (1966). *Transition to turbulence for flow through a dumped bed of spheres*. *Chem. Eng. Sci.* 21(12), 1185–1190.
- Kadlec, H.R., Knight, L.R. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton (1996).
- Koohmishi, M., Palassi, M. (2018). *Effect of gradation of aggregate and size of fouling materials on hydraulic conductivity of sand-fouled railway ballast*. *Constr. Build. Mater.* 167, 514–523.
- Kovács, G. (1981). *Seepage Hydraulics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (1981).
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. SGI Information 1
- Latifi, M.A., Midoux, N., Storck, A., Gence, J-N. (1989). *The use of micro-electrodes in the study of flow regimes in a packed bed reactor with single phase liquid flow*. *Chem. Eng. Sci.* 44(11), 2501–2508.
- Luo, Q., Liu, M., Wang, T., Wu, P. (2020). *Correction Method for Hydraulic Conductivity Measurements Made Using a Fixed Wall Permeameter*. *Math. Probl. Eng.* 2020, 1–9.
- Ma, H., Ruth, D.W. (1993). *The microscopic analysis of high Forchheimer number flow in porous media*. *Transp. Porous Med.* 13(2), 139–160.
- Mohanty, B.P., Kanwar, R.S., Everts, C.J. (1994). *Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 672–677.
- Paiva, C., Ferreira, M., Ferreira, A. (2015). *Ballast drainage in Brazilian railway infrastructures*. *Constr. Build. Mater.* 92, 58–63.

- Permeabilitetstestning (2019). *Geoteknisk undersökning och provning - Laboratorieundersökning av jord - Del 11: Permeabilitetstest (ISO 17892-11:2019)*.
- RIDAS (2020). *Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Tillämpningsvägledning Kapitel 9. Daterad augusti 2020*.
- Rode, S., Midoux, N., Latifi, M.A., Storck, A., Saatdjian, E. (1994). *Hydrodynamics of liquid flows in packed beds: an experimental study using electrochemical shear rate sensors*. Chem. Eng. Sci. **49**(6), 889–900.
- Scheidegger, A.E. (1974). *The Physics of Flow Through Porous Media*, 3rd edn. University of Toronto Press, Toronto.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Salehi, R. (2014). *Non-Darcy Flow of Water Through a Packed Column Test*. Transp. Porous Media **101**, 215–227.
- Seguin, D., Montillet, A., Comiti, J., Huet, F. (1998): *Experimental characterization of flow regimes in various porous media – 2: Transition to turbulent regime*. Chem. Eng. Sci. **53**(22), 3897–3909.
- Siddiqua, S., Blatz, J.A., Privat, N.C. (2011). *Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill*. J. Hydraul. Eng. **137**, 1462–1469.
- Solvik, Ö. (1995). *Stenfyllningsdammars stabilitet vid genomsrämning*. VASO dammkommittés rapport nummer 17. Utrednings- och utvecklingsprojekt med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer.
- Tennakoon, N., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Nimbalkar, S., Neville, T. (2012). *The Role of Ballast-Fouling Characteristics on the Drainage Capacity of Rail Substructure*. Geotech. Test. J. **35**, 104107.
- Van Lopik, J., H., Snoeijers, R., Van Dooren, T. C. G. W., Raoof, A., Schotting, R. J. (2017). *The effect of grain size distribution on nonlinear flow behaviour in sandy porous media*. Transp. Porous Med. **120**: 37 – 66.
- Venkataraman, P., Rao, P.R.M. (1998). *Darcian, transitional, and turbulent flow through porous media*. J. Hydraul. Eng. ASCE **124**(8), 840–846.
- Zhengwen, Z., Grigg, R. (2006). *A criterion for non-Darcy flow in porous media*. Transp. Porous Med. **63**(1), 57–69.

HYDRAULISK KONDUKTIVITET I GROVKORNIGA JORDMATERIAL

Mellan åren 2017 till 2021 har olika grovkorniga jordmaterial testats med syfte att mäta deras hydrauliska konduktivitet. Det har kunnat göras tack vare ny utrustning som gör det möjligt att undersöka jordmaterial med maximala stenstorlekar upp till 250 mm. Material som testats är de man kan finna i en fyllningsdamms fin-, mellan-, grovfilter, dränagezoner och stödfyllning.

Den hydrauliska konduktiviteten för grovkorniga jordmaterial låg mellan 0,3 – 2,0 m/s och är högre än de som vanligtvis används idag. Av den anledningen kan det idag därför förekomma en viss överdimensionering vid diverse uppdateringar av fyllningsdammar. Nya resultat bör arbetas in i RIDAS.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se