

Bergkross som filtermedium i artificiell infiltration

Undersökning av bergkrossprover från Vombverket (Sydvatten) med permeabilitetmätning, siktanalys, metoder för bestämning av hydraulisk konduktivitet och mikroskopering

Musa Riad

**Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 696
(15 hp/ECTS credits)**



**Geologiska institutionen
Lunds universitet
2024**

Bergkross som filtermedium i artificiell infiltration

Kandidatarbete
Musa Riad

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2024

Innehållsförteckning

1. Introduktion	7
2. Mål och syfte	7
3. Bakgrund	7
3.1 Filtermedium i Vombverket	7
3.2 Hydraulisk konduktivitet och jordartmekanism	7
3.2.1 Porositet	7
3.2.2 Kornstorlek	8
3.2.3 Packnings- och sorteringsgrad	8
3.2.4 Kornform	8
3.2.5 Bestämning av hydraulisk konduktivitet	8
4. Material & Metod	9
4.1 Permeabilitettest	9
4.2 Siktanalys	10
4.3 Bestämning av porositet	10
4.4 Bestämning av hydraulisk konduktivitet med empiriska metoder	10
4.4.1 Hazens metod	10
4.4.2 Larssons metod	10
4.4.3 Kozeny-Carmans metod	10
4.4.4 Brevers metod	10
4.4.5 Gustafssons metod	11
4.5 Mikroskopering	11
5. Resultat	11
5.1 Permeabilitetmätning och porositet	12
5.2 Siktanalys	13
5.3 Hydraulisk konduktivitet K (m/s)	13
5.4 Mikroskopering	14
6. Diskussion	15
6.1 Bergkrossens egenskaper	15
6.2 Metoder för bestämning av K-värde	15
6.3 Jämförelse med natursand	15
6.4 Förutsättningar för bergkross som filtermedium	16
6.5 Slutsats	16
6.6 Inför framtida studier	16
7. Referenser	17
8. Appendix A	18
9. Appendix B	19
10. Appendix C	20

Omslagsbild: Foto på en av infiltrationsanläggningar i Vombverket. Bild taget av Musa Riad, 2024

Bergkross som filtermedium i en artificiell infiltration

MUSA RIAD

Musa, R., 2024: Bergkross som filtermedium i artificiell infiltration. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 696, 22 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Dricksvatten är en viktig resurs i Sverige och bör vara tillgänglig varje dag. Problemet uppstår när vi måste välja mellan att bevara natursand och att säkerställa rent dricksvatten. Därför vill Sydsvatten undersöka hur väl bergkross kan fungera som filtermedium. Vombverket är ett vattenverk som använder bassänginfiltration för att skapa konstgjort grundvatten. De har byggt flera dammar med filter av natursand. Vatten pumpas från Vombsjön till dammarna och omvandlas till grundvatten genom infiltration. Efter flera användningar, täpps filtret igen på grund av ackumulation av naturligt förekommande finmaterial, organiskt material och andra utfällningar. Vid rengöring av filtret förlorar man natursand som måste ersättas innan processen påbörjar på nytt. Bergkross har introducerats som ett alternativ till natursand. Till skillnad från natursand är en bergkross en biprodukt från bland annat stenbrott och har karaktäristisk kantiga korn och generell dålig sorteringsgrad. Genom experiment som permeabilitetsmätning, porositetsbestämning, siktanalys, empiriska metoder och mikroskopi undersöks bergkrossens hydrologiska och mekaniska egenskaper och jämförs med natursand. Resultaten visar att testade bergkross inte möter Sydsvattnets standard. Hazens och Gustafssons metod för beräkning av K-värde är inte användbara i detta fall. I stället visade sig att Breyers metod är säkraste metoden att använda för jämförelsen. Alternativt, justera parametrar för Larssons och Kozeny-Carmans metod eller utveckla en ny metod specifikt för bergkross för att finna rätt kornstorleksfördelning som är tillämpbar och uppfyller Sydsvattnets krav. Alternativ lösning är att Sydsvatten utvecklar sin standard för kornegenskaper som används i sina infiltrations bassänger för att inkludera bergkross som filtermedium i artificiell infiltration.

Nyckelord: Bergkross, Vombverket, Sydsvatten, hydraulisk konduktivitet, markmekanik, sandfilter, hydrogeologi, artificiell infiltration

Handledare: Charlotte Sparrenbom, Kristofer Hägg

Ämnesinriktning: Hydrogeologi

Musa Riad, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: musa_riad@hotmail.com

Crushed rock as a filter medium in an artificial infiltration

MUSA RIAD

Musa, R., 2024: Bergkross som filtermedium i artificiell infiltration. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 696, 22 pp. 15 hp (15 ECTS credits)

Abstract: Drinking water is a crucial resource in Sweden and must be accessible every day. A complex issue arises when we must choose between conserving natural resources like sand and ensuring clean drinking water. Therefore, Sydsvatten is investigating the potential of using crushed rock as a filter medium. Vombverket is a water treatment plant that utilizes basin infiltration to produce artificial groundwater. They have constructed basins with filters made of natural sand. Water is pumped from Vombsjön into the basins and seeps slowly through the sediment for 2-3 months, transforming lake water into groundwater. Over time, these filters become clogged due to the accumulation of naturally occurring fine materials, organic matter, and other deposits. Cleaning the filters results in a loss of sand, which needs to be replaced before restarting the process. Crushed rock is proposed as an alternative. Unlike natural sand, crushed rock is a byproduct of quarrying, and has a characteristic feature of angular grains and is generally poorly sorted. By conducting experiments such as permeability test, porosity determination, sieve analysis, empirical methods, and microscopic examination, we can learn more about the hydrological and mechanical attributes of crushed rock grains and compare them to natural sand. The results from this study have indicated that the tested crushed rock does not meet the standard set by Sydsvatten. Hazens and Gustafssons method are not usable in this case to calculate K-value to compare natural sand with crushed rock. Instead, Breyers method for calculating K-value is deemed to be the most reliable method to make the comparison. Alternatively, adjust certain parameters for Larssons and Kozeny-Carmans method or develop a new empiric method specifically for crushed rock. Alternative solution is to readjust standards set by Sydsvatten for grain attributes used in infiltration basins to include crushed rock as filter medium in artificial infiltration.

Keywords: Crushed rock, Sydsvatten, Vombverket, hydraulic conductivity, soil mechanics, sandfilter, hydrogeology, artificial infiltration

Supervisor(s): Charlotte Sparrenbom, Kristofer Hägg

Subject: Hydrogeology

Musa Riad, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: musa_riad@hotmail.com

1 Introduktion

Dricksvatten är ett av det mest undersökta livsmedel i Sverige (Svenskt vatten, 2017). Det finns 1750 kommunala vattenverk etablerade som producerar vatten till landets befolkning, och försörjer oss med ca 900 m³ per år (Svenskt vatten, 2017). I Vombverket produceras dricksvatten med *bassänginfiltration*, en teknik som används för att skapa konstgjort grundvatten med hjälp av deras anläggningsbassängar (Hanson, 2000). Processen är stegvis och börjar i Vombsjön och slutar som drickbart vatten i Burlöv, Lund, Eslöv, Malmö, Staffanstorp, Svedala och Vellinge.

Processen inleder med att vattnet pumpas från Vombsjön, och går igenom mikrosilar där bland annat partiklar och finmaterial från sjön filtreras. Vattnet delas senare upp mellan upp till 54 infiltrationsbassänger, där det sipprar långsamt genom isälvs-material som utgörs av sand och grus. Efter två till tre månader pumpas vattnet upp från närliggande brunnar och behandlas vidare i slutprocesserna i vattenverket (Sydvatten, 2023).

Bassänginfiltration utgår alltså från att ytvatten pumpas till konstgjorda dammar eller bassänger, och tränger ner genom hårt packad natursand och omvandlas till grundvatten (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Naturligt förekommande organiskt material, patogener och finmaterial avlägsnas från vattnet under infiltrationen genom naturliga processer. Detta medför att både organiskt och oorganiskt material ansamlas i filtermaterialet och ökar motståndet i bassängen och därmed försämrar genomsläppligheten. Denna igensättning medför komplikationer då vattnet tar längre tid på sig att infiltrera, och detta kräver att infiltrationsbassängerna regelbundet rengörs och underhålls.

Rengöringen går ut på att tömma/ta bort översta lagret av sand och tvätta bort finmaterial, vilket även medför sandförlust och infiltrationsbassängerna behöver därför fyllas på med ny sand (Hägg & Pott, 2022).

2. Mål och syfte

Syftet med denna studie är att undersöka hurvida bergkross kan användas som filtermedium i en artificiell infiltration på Sydvattens anläggning i Vomb. Målet är att beskriva och presentera bästa möjliga bergkross utav 8 olika prov testade för användning som filter, samt diskutera deras potential och besvara följande frågeställningar:

1. Vad har bergkross för hydraulisk konduktivitet, hur varierar denna beroende på metod för K-värdebestämning och hur passar det in på Sydvattens krav?
2. Hur ändras den hydrauliska konduktiviteten när materialet packas i labb?
3. Hur skiljer sig den hydrauliska konduktiviteten åt mellan tvättat och otvättat bergkrossmaterial?
4. Vilken kornstorleksfördelning bör vi använda för bergkrossmaterial?

3 Bakgrund

3.1 Filtermedium i Vombverket

Anledningen till att natursand används i Vombverkets infiltrationsbassänger beror på sandens goda förmåga för att släppa igenom vatten, fånga upp organiskt och finmaterial på ytan. Den har även en förmåga att bilda en biofilm som är en viktig filtreringsegenskap (Hägg & Pott, 2022). Enligt Chan et al (2018) beskrivs biofilm som ett lager på korn, innehållande mikroorganismer som bakterier. Biofilmen spelar en viktig roll i vattenreningsprocessen då den filtrerar bort föroreningar, virala patogener och skadliga bakterier som *Escherichia coli*. Under reningsprocessen kommer bakterierna i biofilmen att föröka sig och efter antal månader eller år kommer den att täppa till filtret. Utöver det bör filtermediumet vara motståndskraftigt mot vittring, och därmed bör bestå av främst kvarts och fältspat (Hansson, 2000). Glimmermineral är inte önskad på grund av enkla klyvningar som är enkelt att bryta. De kan även reagera med vatten och bilda lermineral (Marshak, 2019). Sanden som används bör ha d_{10} på ca 0,35 mm för en långsamfiltersand enligt ”Dricksvattenteknik – Ytvatten”, och tillämpas på konstgjord grundvattenbildning. Kornen bör helst vara runda, dock kan kantiga material tänkas ha liknande filtreringsförmåga som runda korn (Hansson, 2000). Enligt WHO, bör sanden vara grövre, ha ett medelvärde på d_{10} på lika med eller mer än 0,15 mm. När detta tillämpas för Vombverkets standard, bör d_{10} storleken vara större än 0,21 mm (Hägg & Pott, 2022).

3.2 Hydraulisk konduktivitet och jordartmekanism

Markens genomsläpplighet för vatten kallas *hydraulisk konduktivitet* (K), vilket beskriver ett materials förmåga att släppa genom vatten per tidsenhet (m/s). Jord- eller bergarter har olika hydrauliska konduktivitet beroende på deras fysiska egenskaper som *porositet*, *kornstorlek*, *kornform*, *kompaktion*, samt *sprickfrekvens* och *sprickegenskaper* (Todd, 1959). Permeabilitet hos en jordart är egenskap som påverkas av dess porositet och porogeometri (Ferreira et.al, 2023). Det bör inte förvirras med hydrauliska konduktivitet som anger materialets genomsläpplighet med avseende på vätskans egenskaper.

3.2.1 Porositet

Porositet är sambandet mellan porvolym och den totala volymen är vad beskriver porositet (Svensson, 2014). Porositet går att bestämma genom att uppskatta porvolym och den totala volymen hos en jordart och kan delas in i *primär* och *sekundär porositet*. För den primära porositeten är det så att utrymmena i ett material skapas samtidigt som det geologiska materialet formas, till exempel glacialfluviala jordarter. Sekundär porositet skapas av yttre påverkan som vittring och sprickbildning, exempel kristallin berggrund. Sandsten är en bergart som kan ha både primär och sekundär porositet, ett så kallat tvåporssystem. Den totala porvolymen som ett geologiskt material kan användas för grundvattenflöde kallas för totalporositet. Porositet i vilket vatten kan flöda igenom ett material benämns som kinematisk porositet och är viktigt för hur väl ett material kan transportera vatten (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Andel

porositet varierar i olika jord- och bergarter (Todd, 1959). Finkorniga kohesion jordarter som lera kan ha mellan 25–75 % porositet. För sand och grus är intervallet mellan 15 – 45 % (Larsson, 2008). Moränens komplexa och oförutsägbara kornform och kornstorleksfördelning lämnar lite möjlighet för att fastställa en porositetintervall. I stället hänvisas man till moränens permeabilitet och hydrauliska konduktivitet som styrs av moränens lokala egenskaper, som till exempel lera/silt halt (Bernell, u.å.). Genom experiment, är det möjligt att bestämma porositet för en jordart (Freeze & Cherry, 1979). I denna rapport behandlas bergkross på samma sätt som morän, och därför används moränens porositet som en representation för bergkrossens porositet. Detta motiveras dels av att bergkross och morän delar liknande egenskaper som kornform och kompaktion, dels av att det finns begränsad information om bergkross som ett poröst material från ett hydrogeologiskt perspektiv.

3.2.2 Kornstorlek

Kornstorlek och kornstorleksfördelningen påverkar den hydrauliska konduktiviteten (Svensson, 2014). Det kan påverka porositeten i en jordart, det vill säga hur mycket vatten jordmaterialet kan släppa igenom och även hur mycket vatten som kan absorberas. Finkornigt material som lera och silt suger åt vatten med kapillära krafter, medan sand och grus har en hög genomsläpplighet och är dålig på att fänga upp eller hålla kvar vatten. Osorterade jordarter som morän kommer att uppvisa varierande resultat gällande genomsläpplighet (Sparrenbom & Jepsson, 2022). En sorterad jordart med stora korn har högre hydraulisk konduktivitet än finkornig jordart. Större korn medför generellt sett porutrymme än mindre korn (Fetter, 2001).

3.2.3 Packnings- och sorteringsgrad

Hur kompakt en jordart är påverkar porositeten (Svensson, 2014). En väl sorterad jordart kommer att ha öppen struktur med hög total porositet. En osorterad jordart har olika kornstorlekar som kan fylla porer och kommer att ha en tätare struktur som resulterar i låg total porositet (Sparrenbom & Jepsson, 2022). Hårt packat material kommer därför ha lägre totalporositet, till skillnad från löst packat material. Packningsgraden kan bestämmas genom att använda sambandet mellan torrdensitet och torrdensitet vid hård belastning (Larsson, 2008)

3.2.4 Kornform

Kornen hos olika jordarter kan ha varierande form. Formerna på kornen avgör hur materialet kan packas och vilken riktning vatten kommer att röra sig inom jordarten, se fig 1 (Svensson, 2014). Jordarter kan packas på två olika sätt; kubisk och romboedrisk packning. Löst packade och väl sorterade jordarter kommer att ha kubisk packning med högre totalporositet, medan morän som normalt består av kantiga korn och är relativt osorterad material packas romboedriskt vilket lämnar lite totalporositet (Sparrenbom & Jepsson, 2022). Ett korn som har blivit utsatt för transport och således mekanisk vittring, kommer att ha mer avrundad form. Till skillnad från natursand, är partiklarna från bergkross kantiga har en omogen yta, och har inte genomgått naturliga processen av nötning och bearbetning under istiden (Lagerblad

et.al, 2011).

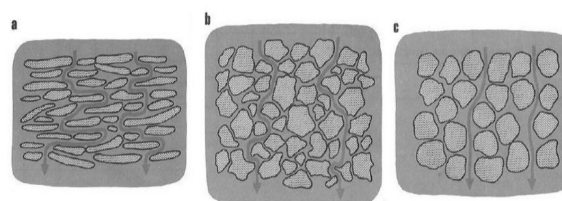


Fig. 1. Skiss över hur kornformen kan påverka vattnets rörelse genom ett poröst medium (Svensson, 2014)

3.2.5 Bestämning av hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas med hjälp av teoretiska, experimentella och in situ metoder. Med hjälp av formler, är det möjligt att använda egenskaper som kornstorleksfördelning, packningsgrad, porositet och kornform. Eftersom en jordarts hydrologiska egenskaper är komplex och oförutsägbara, finns det få pålitliga formler för att beräkna K -värdet (Todd, 1959). De metoder som använts i denna studie är Hazens, Larssons, Kozeny-Carmans, Beyers och Gustafssons.

Experimentella metoder, som permeameter är användbara för att bestämma hydraulisk konduktivitet, se fig 2. Här låter man vatten flöda genom en provhållare med känd längd och tvärsnittsarea under en höjdskillnad. Med kända parametrar kan hydraulisk konduktivitet beräknas med formeln:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h}$$

Där K är hydraulisk konduktivitet (m/s), Q är flödet på vattnet (m^3/s), A är tvärsnittsarean (m^2) och Δh är skillnaden i hydraulisk trycknivå (m) (Hussain & Nabi, 2016)

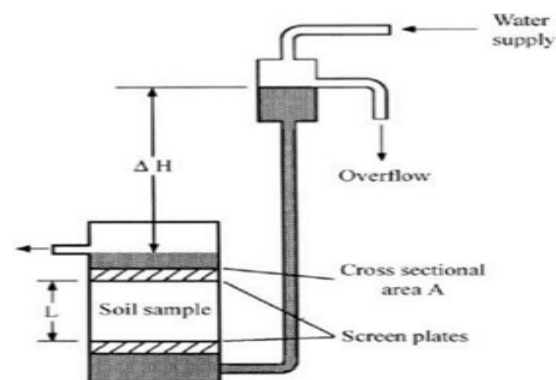


Fig. 2. Illustration av permeameter apparaten av Domenico och Schwartz, 1990 (Hussain & Nabi, 2016). Modifierad med skärklipp.

Varje metod är utvecklad för att undersöka specifika porositetsegenskaper från en sikturva framställd genom siktning och hydrometeranalys. Från sikturorna noteras d_{10} , d_{60} och graderingstalet C_u kan beräknas. Effektiv kornstorlek är annat namn för d_{10} och är den kornstorlek där 10% av partiklarna är

mindre än diametern vid d_{10} . För d_{60} gäller det att 60% alla partiklar i provet har en diameter mindre än d_{60} (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Effektiva kornstorleken är en bra uppskattning av hydraulisk konduktivitet, som inte påverkas av helhetstäckande kornstorleksfördelningen (Hägg & Pott, 2022). Sikt-kurvorna framställs av Excel programmet KORN-STOR.xls (Andersson, 2010; Pers.kom. Charlotte Sparrenbom, 2024). Både d_{10} och d_{60} används för att beräkna graderingstal C_u :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

C_u indikerar en jordarts sorteringsgrad. Hög C_u innebär att materialet är dåligt sorterat jämfört med lågt C_u som är väl sorterat (Sparrenbom & Jeppsson, 2022).

Hydraulisk konduktivitet kan även bestämmas in situ. Spårämnen, så kallade *tracers* som kalciumklorid kan användas för att undersöka hur snabbt vattnet transporteras från ett borrhål till annat. Detta är förutsatt att borrhålen ligger med hyfsat avstånd från varandra, flödesriktningen är känt och att hydrauliska konduktiviteten är inte varierande i akvifären (Todd, 1959). Sluttest kan också användas för att bestämma hydraulisk konduktivitet, där man skapar en volymförändring i en stabil vattennivå och mäter tiden det tar för vattennivån att återgå till stabilitet (Sparrenbom & Jeppsson, 2022).

4 Material & Metod

Metoder som permeabilitetstest, siktanalys, beräkning av hydraulisk konduktivitet samt mikroskopering användes för att testa åtta olika prover. Dessa prover var erhållna från Sydvatten AB. Natursand som används i experimentet används som jämförelsebar mot bergkross. "Ympgrus" är natursand med intakt mikrobiologisk fauna, som ska illustrera hur

biofilm påverkar natursanden. Tvättad prov innebär att finkornigt material har avlägsnats från materialet. Under experiment och beräkning betraktades bergkross som morän, med hänsyn till likheterna på sorteringsgraden och kornens kantighet. Proverna som testas är följande;

Otvättad Stenmjöl (NCC), Skrylle
 Tvättad Stenmjöl (NCC), Skrylle
 Otvättad bergkross (Sydsten), Dalby
 Tvättad bergkross (Sydsten), Dalby
 Otvättad bergkross (SWEROC), Blentarp
 Otvättad rågrus (Damm 219), Vomb
 Tvättad grus (Damm 11), Vomb
 Otvättad ympgrus (damm 11), Vomb

Empiriska metoder som använts i denna studie är; Hazens, Larssons, Kozeny-Carmans, Breyers och Gustafssons. Dessa metoder tar hänsyn till kornstorleksfördelningen som omfattar effektiv kornstorlek och för vissa, graderingstal. De är även tillämpbara på olika sätt, baserat på miljö och kornens egenskaper som kornstorlek, porositet och andra faktorer i relation till hydraulisk konduktivitet (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Olikheterna mellan metoderna kommer förhoppningsvis lyfta fram vilka parametrar som är mest avgörande för hydrauliska konduktiviteten hos bergkrossmaterial, och hur det urskiljer sig från hydraulisk konduktivitet för natursand.

4.1 Permeabilitetstest

Med hjälp av perkolationsrör, bestämdes hydrauliska konduktiviteten i samtliga prov. Varje prov packades likartat i ett perkolationsrör till ca 10 cm, se fig 3. Packningsprocessen innefattade att man lade till två matske-dar av provet i röret, tillsatte en liten mängd vatten och stampade materialet två gånger med en träpinne. Denna procedur upprepades tills provets längd uppnådde ca 10 cm. Rören fylldes med vatten en sista gång till gränsen av proven med syfte att skölja bort finmaterial och ytterligare packa proverna. Två olika trycknivåer markerades på rören; h_1 vid 20 cm, och h_0 vid 30 cm. Vattnet



Fig. 3. Foto på uppställning för permeabilitetmätning. Tiden det tar för vattnet att passera 10 cm från två olika trycknivåer noterades i detta experiment. Foto taget av Musa, 2024.

fylls till nivå H_0 och tiden det tar för vattnet att passera från h_0 till h_1 noterades. Enligt Fetter (2001) beräknas hydraulisk konduktivitet för varje prov med följande ekvation:

$$K = \frac{l}{t} \ln \frac{h}{h_1}$$

K är hydraulisk konduktivitet (m/s), l är provets längd (m), t är tiden (s), och trycknivåerna h_0 respektive h_1 (m). Experimentet upprepades 5 gånger för att produ-

$$n = 100 \frac{V_p}{V}$$

cera ett medelvärde på hydraulisk konduktivitet.

4.2 Siktanalys

Samtliga åtta proverna förbereddes genom att vägas sedan genomgå ugnstorkning under 105°C i 24 timmar. Proverna vägdes in baserat på sorteringsgrad, med 300–350 g för sorterat material och ca 500 g för osorterat material. Proverna lades in i en siktkolumn och skakades i 15 min i en skakapparat. Mängden material som ansamlas i varje sikt vägdes igen och noterades. Slutligen användes resultatet i KORNSTOR.xls för att få fram siktkurva, och avläsa d_{10} och d_{60} .

4.3 Bestämning av porositet

Porositeten kunde bestämmas genom att fylla bägare med 100 ml av de torkade proverna som sedan packades och vägdes. En känd mängd vatten tillsattes till bägaren tills vattnet fyllde alla porer i provet, och provet vägdes igen. Vattenmassan kunde bestämmas genom formeln:

$$m_w = m_{tot} - m_s$$

Där m_w är vattenmassan i provet, m_{tot} är totala massan och m_s är massan fast material i provet.

Volymen porer i ett vattenmättat prov kunde räknas som $V_p = V_w = m_w / \rho_w$. V_p är porvolym (cm^3), V_w är vattenmättade volymen (cm^3) och ρ_w är vattnets densitet (g/cm^3)

Porositeten blir då enligt formeln:

Där n är porositeten (-), V_p är porvolymen (cm^3) och V är totala volymen (cm^3).

4.4 Bestämning av hydraulisk konduktivitet med empiriska metoder

Ett antal metoder har producerats för att beräkna hydraulisk konduktivitet K baserat på porositetegenskaper från siktkurva. Metoderna är empiriska och framtagna för att användas på vattenmättade sandiga och grusiga prover. För att bestämma K -värdet används formler som har en grundläggande utformningen, där d representerar effektiv kornstorlek, vanligtvis används d_{10} (mm) och C' är en faktor som kan bestå av porositet, värskans egenskaper och densitet. K är mätt i meter per sekund (m/s) Sparrenbom & Jeppsson, 2022):

$$K = C' d^b$$

4.4.1 Hazens metod

Hazens metod är välkänd och används brett för att bestämma hydraulisk konduktivitet för sorterade material med kornstorlekar mellan 0.1 mm till 3 mm (Husain & Nabi, 2016). Dessutom behöver C_u vara mindre än 5. Metoden är utvecklad vid framställning av sandfilter i vattenverk (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Vid uppfyllda kriterier, kan följande ekvation tillämpas:

$$K = 0,01158 d_{10}^2$$

K är hydraulisk konduktivitet (m/s) och d_{10} är effektiva kornstorleken (mm).

4.4.2 Larssons metod

Larssons metod för att beräkna hydraulisk konduktivitet inkluderar vattentemperatur samt jordarterns lagring. Metoden är inte användbar i finkorniga jordarter som lera (Larsson, 2008). För formeln gäller:

$$K = C d_{10}^2 (0,7 + 0,003t)$$

K är hydrauliska konduktiviteten (m/s), C är koefficienten baserat på jordartens gradering och kan variera mellan $1,2 \times 10^{-2}$ och $1,5 \times 10^{-2}$ och t är temperatur ($^\circ\text{C}$). För löst packat natursand gäller $C = 0,012$, och t är uppmätt till $15,3^\circ\text{C}$.

4.4.3 Kozeny-Carmans metod

I Kozeny-Carmans metod används kornstorlek och porositet för att beräkna den hydrauliska konduktiviteten (Hussain & Nabi, 2016). Numera är det den mest använda metoden och den förekommer i flera olika former. Kozeny-Carmans metod, likt Larssons metod, är inte användbar i finkorninga jordarter såsom lera (Alvarado Blohm F.J., 2016). Hussain & Nabi (2016) presenterar formeln som tar hänsyn till densitet ρ (kg/m^3), tyngdaccelerationen g (m/s^2), dynamiska viskositeten för vatten μ (Ns/m^2), porositeten n (-), d_{10} (mm) och hydraulisk konduktivitet K (m/s).

$$K = \frac{\rho g}{\mu} 8,3 \cdot 10^{-3} \frac{n^3}{(1-n)^2} \left(\frac{d_{10}}{1000}\right)^2$$

4.4.4 Breyers metod

Breyers metod används för att beräkna hydraulisk konduktiviteten för dåligt sorterade jordarter med kornstorlek mellan 0,06 mm och 0,6 mm (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Den tar inte hänsyn till porositet men betraktar graderingstalet C_u (Hussein & Nabi, 2016). Formeln för metoden gäller enligt följande:

$$K = \frac{\rho g}{\mu} 6 \times 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{C_u} \left(\frac{d_{10}}{1000}\right)^2$$

För formeln gäller ρ (kg/m^3), tyngdaccelerationen g

(m/s²), dynamiska viskositeten för vatten μ (Ns/m²), porositeten n (-), d_{10} (mm) och hydraulisk konduktivitet K (m/s).

4.4.5 Gustafssons metod

Gustafssons metod betraktar d_{10} (mm), och $E(C_u)$ i sin formel att beräkna K -värdet. Används främst för sand och grus (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Metoden utgår från jämförelsen mellan stort antal resultat från siktning av jordprov och direkta mätningar i brunnar (Gustafson, 1983). Metoden används mest i Sverige (Svensson, 2014). Formeln för metoden är enligt följande:

$$K = E(C_u) \left(\frac{d_{10}}{1000}\right)^2$$

$E(C_u)$ är ett förhållande mellan portal och den specifika ytan som funktion av graderingstal (Sparrenbom & Jeppsson, 2022) som beräknas enligt:

$$E(C_u) = 10,2 \cdot 10^6 \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{1}{g^2(C_u)}$$

Portal e , är samband mellan volymerna för porrum och volym av det fasta materialet, medan $g(C_u)$ är

specifika ytan som funktion av graderingstal (Sparrenbom & Jeppsson, 2022). Båda beräknas enligt följande:

$$e = 0,8 \left(\frac{1}{2 \ln(C_u)} - \frac{1}{C_u^2 - 1}\right)$$

$$g(C_u) = \frac{1,30}{\log(C_u)} \cdot \frac{C_u - 1}{C_u^{1,8}}$$

4.5 Mikroskopering

Mikroskopering användes för att få en bild på kornens utseende och form. Vid utförandet användes mikroskopet Olympus SZX10 med kameran IVA2300KPB med upplösning på 1920 x 1200. Ett mm-papper användes som underlag och skala, och varje prov placerades i en ren petriskål. Slutligen fotograferades varje prov.

5. Resultat

Under detta avsnitt presenteras resultat från utförda ovan nämnda undersökningar. För siktkurvor från siktanalysen utförda i KORNSTOR.xls och bilder från mikroskopering, se appendix.

Tabell 1: Resultat från permeametermätning och bestämd porositet. För varje prov presenteras medelvärde för beräknade hydrauliska konduktiviteten och porositet. Totalt fem försök har utförts för varje prov.

Prov	Hydraulisk konduktivitet K (m/s)	Porositet (%)	Förs #1 tid (s)	Förs #2 Tid (s)	Förs #3 Tid (s)	Förs #4 Tid (s)	Förs #5 Tid (s)
1. Stenmjöl NCC Skrylle	$6,920 \times 10^{-7}$	33,4	54 113	57 254	64 052	64 243	70 667
2. Tvättat Stenmjöl NCC Skrylle	$1,060 \times 10^{-4}$	38,4	344	378	411	432	465
3. Bergkross Sydsten Dalby	$1,021 \times 10^{-5}$	36,2	4536	4870	3745	4135	4774
4. Tvättad Bergkross, Sydsten Dalby.	$1,403 \times 10^{-4}$	40,2	295	317	335	349	377
5. Bergkross SWEROC Blentarp	$1,615 \times 10^{-5}$	36,7	2222	2523	2794	2873	2904
6. Otvättad Rågrus (Damm 219)	$5,383 \times 10^{-4}$	39,5	64	71	80	87	93
7. Tvättat grus (Damm 11)	$5,278 \times 10^{-4}$	39,5	74	82	81	89	96
8. Otvättat ympgrus (Damm 11)	$1,133 \times 10^{-4}$	34,9	369	384	413	419	426

Tabell 2: Resultat extraherat från KORNSTOR.xls och anger d_{10} och d_{60} för samtliga prov samt sorteringsgraden C_u

Prov	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	C_u (-)
1. Otvättad stenmjöl NCC Skrylle	0,089	0,51	5,730
2. Tvättad stenmjöl NCC Skrylle	0,15	0,70	4,667
3. Otvättad bergkross Sydsten Dalby	0,09	0,49	5,444
4. Tvättad bergkross, Sydsten Dalby	0,13	0,85	6,538
Otvättad bergkross SWEROC Blentarp	0,0725	0,64	8,889
6. Otvättad Rågrus (Damm 219)	0,31	0,8	2,581
7. Tvättad grus (Damm 11)	0,30	0,80	2,676
8. Otvättad ympgrus (Damm 11)	0,22	0,86	3,909

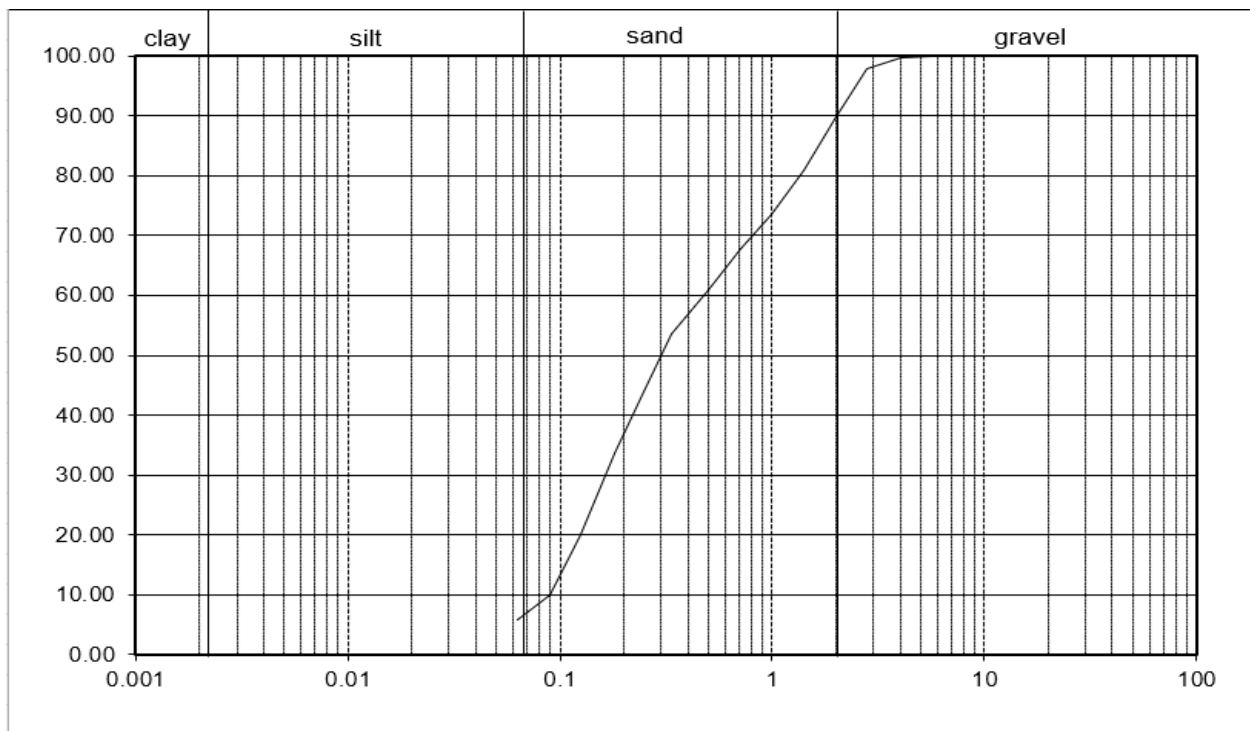


Fig. 4. Sikturva för prov 5. Högt C_u -värde kommer att ge upphov till flackare kurva. Det innebär att prov 5 har sämre sorteringsgrad än prov 6. Y-axeln är andel prov (%) och x-axeln är kornens diameter (mm). Kurvan är producerade i KORNSTOR.xls.

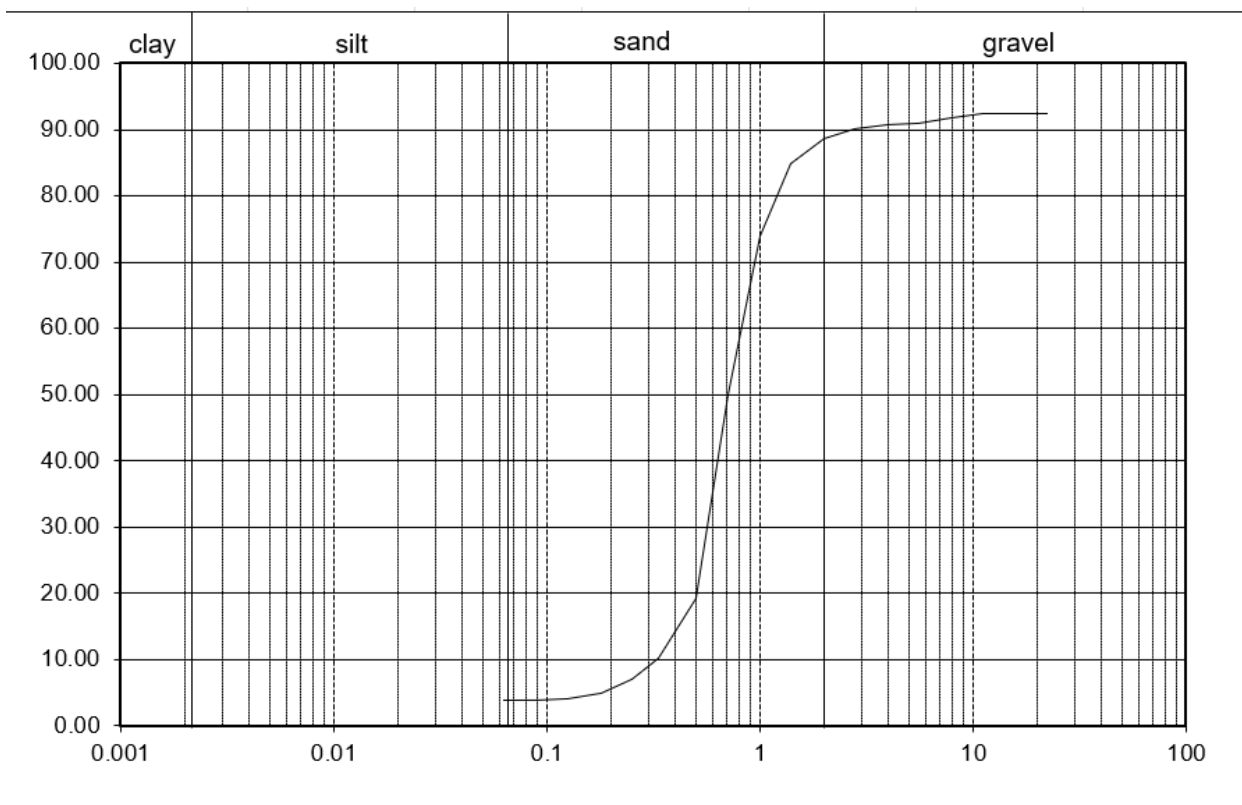


Fig. 5. Sikturva för prov 6 består av en brantare kurva jämfört med prov 5. Kurvan återspeglar låg C_u - värde som kännetecknas av ett väl-sorterat prov. Y-axeln är andel prov (%) och x-axeln är kornens diameter (mm). Kurvan är producerade i KORNSTOR.xls.

5.1 Permeabilitetmätning och porositet

Den hydrauliska konduktiviteten som representeras av ett K-värde kunde beräknas med hjälp av permeabili-

tetmätningar, se tabell 1. Packningen av alla prov har utförts på samma sätt som beskrivs i metodavsnittet. Prov 1 visar lägst K-värde, och visar en skillnad på $1,5208 \times 10^{-4}$ m/s gentemot prov 2 som är tvättat prov

från samma ursprung. Skillnaden i K-värde mellan prov 3 och 4 var mindre jämfört med prov 1 och 2, trots att prov 4 har högst porositet av samtliga prov. Prov 5 har högst hydraulisk konduktivitet bland otvättade bergkrossprover. Grus från dammarna har betydligt högre K-värde jämfört med bergkross, med K-värde på högst $5,383 \times 10^{-4}$ m/s för otvättat rågrus och lägst för ympgrus med $1,133 \times 10^{-4}$ m/s. Notera att tvättat grus har lägre K-värde än otvättat, se prov 6 och 7 i tabellen.

5.2 Siktanalys

Resultatet visar att prov 6 visar högst sorteringsgrad med C_u på 2,581 jämfört med prov 5 som visar lägsta C_u på 8,889, se tabell 2. För prov 1 och 2, minskar C_u för prov 1 tvättat prov jämfört med prov 2. Resultatet blir annorlunda för prov 3 och 4, då prov 3 otvättad bergkross har högre C_u värde än prov 4 tvättad bergkross. Detta gäller även för prov 6 och 7, dock är skillnaden mellan de två proverna väldigt liten.

Otvättat ympgrus visar en anmärkningsvärt C_u värde på 7,176, och är inte karaktäristiskt för grus från samma lokal som prov 7. För samtliga siktkurvor, vikt från siktanalysen och inmatning i KORNSTOR.xls, se appendix.

Siktkurvor från prov 5, som representerar bergkross och prov 6 som representerar naturgrus är jämförbara. Högt C_u värde resulterar i flackare kurva jämfört med lägre C_u värde, se figur 3. Både prov 5 och 6 består av främst kornstorleken sand. Prov 5 uppvisar flack siktkurva, se figur 3, jämfört med prov 6 som har en brant siktkurva, se figur 4. Detta indikerar att prov 5 har sämre sorteringsgrad än prov 6. Siktkurvor för samtliga prover finns i appendix.

5.3 Hydraulisk konduktivitet

För samtliga prover fanns det variation i K-värde från de olika metoderna. För Hazens hade prov 1 lägst värde och prov 6 störst, se tabell 3. Metoden fungerar inte för majoriteten av proverna (markerat med gult) eftersom C_u är större än 5. I resultatet från Larssons metod fanns

Tabell 3. K-värden på samtliga prover beroende på beräkningsmetod. För varje prov innebär färgerna: gul = uppfyller ej kravet, grön = uppfyller kravet, ljusblå = uppfyller krav med anmärkning. För Larssons metod bör koefficienten C bestämmas för varje prov. Gällande Kozeny-Carmans bör proverna packas i större skala för att porositeten ska vara jämförbar med hur det är packat i en bassäng.

Prov	Hazens (m/s)	Larssons (m/s)	Kozeny-Carmans (m/s)	Breyers (m/s)	Gustafsson (m/s)
1.Stenmjöl NCC Skrylle	$9,17 \cdot 10^{-7}$	$8,86 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$	$7,75 \cdot 10^{-5}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$
2.Tvättat Stenmjöl NCC Skrylle	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$	$6,63 \cdot 10^{-2}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$6,22 \cdot 10^{-3}$
3.Bergkross Sydsten Dalby	$9,38 \cdot 10^{-5}$	$5,58 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$
4. Tvättad Bergkross, Sydsten Dalby	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$
5.Bergkross SWEROC Blentarp	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$5,80 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-3}$
6. Otvättad Rågrus (Damm 219)	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-1}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
7.Tvättat grus (Damm 11)	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-1}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$
8. Otvättat ympgrus (Damm 11)	$5,61 \cdot 10^{-4}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-1}$	$5,14 \cdot 10^{-4}$	$7,71 \cdot 10^{-2}$

det mindre variationer på K-värde än vid Hazens, där prov 3 har lägst K-värde, och prov 6 har störst. Vid beräkning med Larssons, har det antagits samma packningskoefficient C för alla prov. Enligt Sparrenbom & Jeppsson (2022), gäller koefficient 0,015 för ensgrade-rad jord med $C_u < 6$. Dock användes koefficient på 0,012 för löst packat natursand, med tanke på att samtliga prover hade varierande graderingstal. Eftersom valda packningskoefficienten inte kan gälla för alla prov, får metoden en anmärkning. Resultatet för Kozeny-Carmans gav högst hydraulisk konduktivitet jämfört med andra metoder. Detta kan förklaras av den höga porositeten som fastställdes i laboratoriet, och får en anmärkning eftersom packningen inte återspeglar inte den packning som sker i anläggningsbassängarna. Breyers metod visar skillnaden mellan tvättat och otvättat material, samt skillnaden mellan natursand och bergkross. Parametrarna som använts i Breyers metod är inte påverkade av experimentella försök, utan enbart provens mekaniska egenskaper. Gustafssons metod beaktar faktorer som portal vilket i sin tur beror på porositeten. Dessutom är Gustafssons metod anpassad för isälvsmaterial. På grund av detta uppfyller inte bergkross proverna kriterierna för Gustafssons metod, och natursand får en anmärkning på grund av sin höga porositet i resultatet.

Sambandet mellan hydraulisk konduktivitet K i både testade och beräknade metoder för alla prov är sammanställda i en graf, se figur 5. Resultatet indikerar att hydrauliska konduktiviteten ökar med större effektiv kornstorleken d_{10} . Kozeny-Carmans metod visar största avvikelsen från resultatet uppmätt i laboration med permeameter, dock följer den liknande trend. Däremot följer metoden en liknande trend som uppvisas av permeameter. Gustafssons metod har högre K-värde än upp-

mätta resultat från permeameter testet i lägre d_{10} men närmar sig i högre d_{10} . Relationen mellan hög d_{10} och Gustafssons metod är oklar, men hypotesen är att det beror på sambandet mellan porvolym och graderingstal. K-värden från Larssons och Breyers metod är ungefär lika, och ligger närmast K-värdet från permeameter. Hazens metod håller liknande trend som Breyers och Larssons metod, men avviker i en punkt.

5.4 Mikroskopering

Bilder från mikroskopiundersökningen finns i appendix, se bild 1.

Prov 1. Visar vita och gråa korn som förkom i olika storlekar. De gråa kornen varierade 2–4 mm i längd, men mindre förkom också. De vita kornen varierade från $<0,1$ mm till 4 mm. Formen var väldigt kantig och oregelbunden. Kornen var sprickiga. Kornens dominanta vita färg tydde på att mineralinnehållet bestod av främst plagioklas.

Prov 2. Hade varierande kornstorlekar 0,3 – 5 mm och korn i vita och gråa färger. Kornen var kantiga och sprickiga, dock till skillnad från prov 1, saknades de allra finaste kornen ($<0,1$ mm).

Prov 3. Innehöll kantiga korn med oregelbunden kornform. Grönt delar på korn noterades. Rosa/orange var den dominanta färgen, och kornstorlekarna var varierande från $<0,1$ mm till 4 mm. Den rosa färgen indikerade att kornen var rik på alkalifältpater. Enstaka gråa korn kunde noteras, kan tyda på kvarts.

Prov 4. Liknande prov 3, visade det en variation på kornstorlekar från $<0,1$ mm till 4 mm. Vissa korn uppvisade. Orange/röd färg var dominerande. Provet indikerar att kornen var rik på alkalifältpater. En-

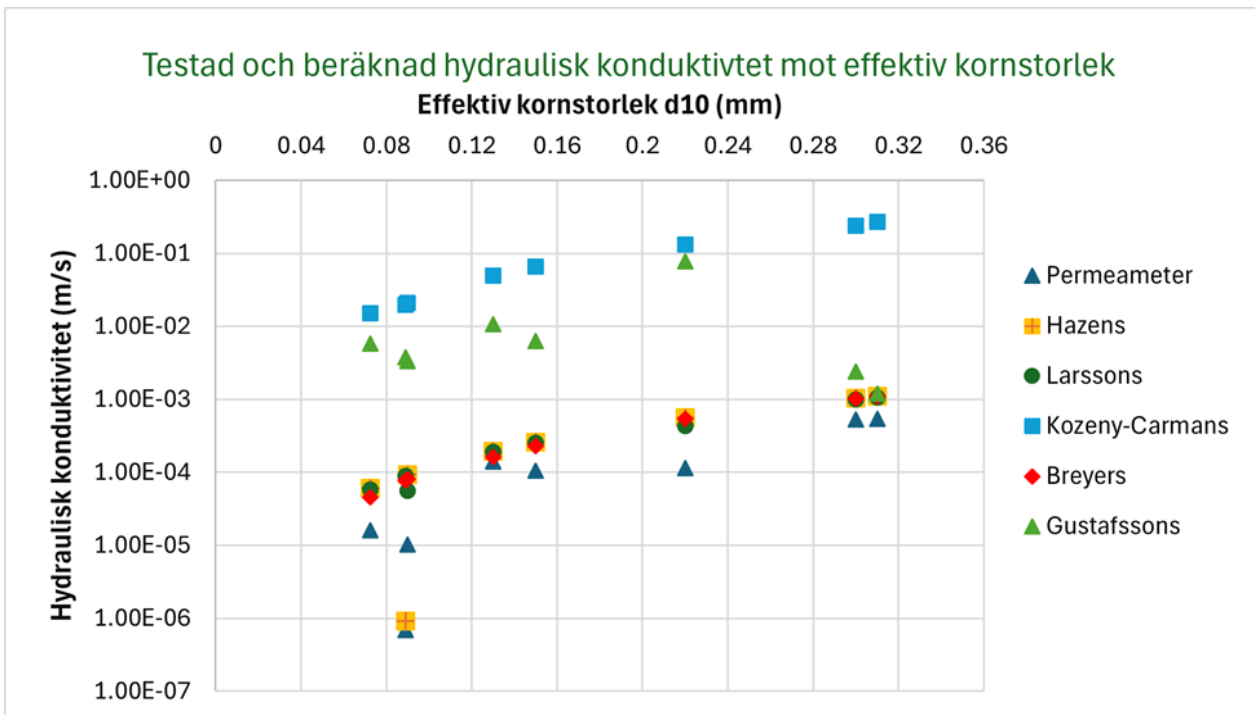


Fig. 6. Diagram över alla undersökta hydraulisk konduktivitet värden mot effektiva kornstorleken. I y-axeln är K-värden (m/s) med logaritmisk skala och i x-axeln presenteras effektiva kornstorleken d_{10} (mm). Relationen mellan hydraulisk och effektiva kornstorleken visar en högre K-värde vid större d_{10} . Punkter inringade i rött är data för natursand (tvättade och otvättade), och punkter omringade i svart är data för ympgrus.

staka gråa korn kunde noteras, kan tyda på kvarts.

Prov 5. Kornen var kantiga och oregelbundna. Gröna områden kunde noteras på kornen, som också ut i mindre fraktioner. De mörka kornen visade glimrande egenskaper. Storleksvariationen på kornen var från 0,1 mm till 5 mm.

Prov 6. Rundade korn med storleksvariation från 0,25 mm till 3 mm. Kornen var relativt enhetliga i både storlek och form.

Prov 7. Majoriteten av kornen var rundade och provet uppvisade tydligare storleksvariationer jämfört med prov 6, från 0,1 mm till 4,5 mm.

Prov 8. Kornen var rundade och förekom i olika storlekar. Grön tillväxt går att hitta på kornen, som efterliknade det fina materialet. Organiskt material var närvarande.

6. Diskussion

6.1 Bergkrossens egenskaper

Bergkross har korn med karakteristisk kantig och oregelbunden form eftersom de inte har bearbetats av naturens processer därmed saknar rundad form. Av den anledningen förväntas kornen att packas på ett romboedriskt sätt, likt en bottenmorän, som resulterar i en lägre totalporositet jämfört med natursand. Däremot visade sig att porositeten i bergkrossmaterial inte nödvändigtvis vara mindre än natursand på grund av hur de packas, men istället är mer varierande. Som förväntat, är porositeten högre hos tvättad material än otvättad som konsekvens av mindre finkornigt material som ockuperar porutrymmet mellan kornen. Kornens sprickighet indikerar en svaghet som gör att de lättare bryts sönder, vilket förklarar förekomsten av finmaterial även i tvättade prover och är sannolikt oundvikligt för de undersökta bergkrossmaterialen.

Permeametermätningar visade att tiden det tar vattnet att tränga genom proverna ökar för varje försök, vilket förklaras av att vattnet packar kornen ytterligare. Undantag gäller för prov 3 vars tid ökade i försök #1 och #2 och minskade i #3 innan den ökade på nytt i resterande försök. En hypotes är att prov 3 förlorade finmaterial under upprepade mätningar innan den packades om på nytt. Annan hypotes kan enkelt förklaras med prov 3 oförutsägbara kornform och packning.

I denna studie har inget referensvärde för porositet från bergkross eller morän använts, vilket innebär att resultaten från permeametermätningen inte lämpar sig för jämförelser. Bergkross visar generellt lägre hydraulisk konduktivitet än hos natursand i permeametermätningar och i empiriska undersökningsmetoder. Detta beror troligtvis på kornens form, som påverkar både packningen och vattenrörelsen i porerna. Närvaro av finkornigt material täpper till hålrummen mellan kornen, därmed minskar hydrauliska konduktiviteten. Det återstår att se hur väl bergkross påverkas av packningen som utförs in situ i bassängerna.

6.2 Metoder för bestämning av K-värde

Metoderna som har använts visar olika k-värden för varje prov. Hazens metod är beroende av att graderingstalet C_u är mindre än 5. I princip bör metoden inte vara användbar för det undersökta bergkrossmaterialet på grund av den generellt höga C_u värde. Ändå visades det i resultatet att Hazens metod visar liknande resultat från permeameter testet. Därför kan metoden inte utslutas, skulle man producera fram bergkross med $C_u < 5$.

För Larssons metod användes koefficienten C på 0,12 för alla prover, men eftersom denna koefficient används för löst packat sand, behövs flera undersökningar för fastställa ett koefficient C för varje prov. Av den anledningen är det inte rimligt att använda Larssons metod för att jämföra K-värdet mellan de undersökta proverna.

När det kommer till Kozeny-Carmans metod är jämförelsen mer rättvis men är ofullständig på grund av den höga porositeten som resultat av en icke-realistisk packning. Detta ledde till att Kozeny-Carmans metod resulterade i högsta K-värdet jämfört med de andra metoderna som användes i studien. För att metoden ska anses vara tillförlitlig för jämförelse av K-värden mellan undersökta proverna, bör samtliga prover packas i en skala som motsvarar den packning som utförs i bassängerna i Vombverket.

Breyers metod beaktar parametrar som inte är påverkade av laboratorieexperiment. Metoden har högst trovärdighet och är lämpligast att använda för att jämföra K-värde mellan alla prover. Med tanke på att metoden är användbar för dåligt sorterade jordarter, och är tillämplig för flera typer av jordarter, kan man ifrågasätta hur väl Breyers metod fungerar för väl sorterade jordarter som natursand.

Syftet med att undersöka bergkross med Gustafsons metod är att utnyttja metodens parametrar för att jämföra K-värdet för samtliga prov, men också jämföra med andra metoder. Resultatet visade att Gustafsons metod har ett K-värde för högre d_{10} som påminner om K-värdet från labbskalan. Det är osäkert vad detta beror på. Även om graderingstalet påverkas av d_{10} , kan den inte förklara varför högre d_{10} ger pålitligare resultat. Det kan även inte förklaras av porositeten, då hade metoden visat liknande resultat för lägre d_{10} från dem undersökta proverna. Hypotesen är att det ska finnas ett samband mellan porvolym och låg graderingstal tillsammans, vilket överensstämmer med att metoden är mest tillämplig för sand och isälvsmaterial. Metoden är därmed inte användbar för dem undersökta bergkrossmaterial.

Det är viktigt att notera att det inte nödvändigtvis är dessa metoder som är bäst för bergkross. Alternativt skulle man utveckla nya metoder specifikt för bergkross.

6.3 Jämförelse med natursand

Natursand och ympgrus har använts som jämförelsebas mot bergkross i denna studie. Biofilmen som förväntas komma att finnas på sanden och bergkross vid användning, är en viktig filtreringsfaktor. I mikroskopieringsundersökning kunde organiskt och finmaterial noteras runt kornen för ympgrus. Som resultat har ympgrus större graderingstal C_u än vanlig natursand, vilket förklarar hur ympgrus visar lägre hydraulisk konduktivitet i empiriska metoder än natursand. Denna organiska tillväxt täpper till porutrymmet vilket kommer även att påverka den kinematiska porositeten i vilket vatten flödar igenom och därmed sänka hydrauliska konduktiviteten, som går att notera i permeametermätning. Det går inte att berätta hur väl biofilmen kommer att reagera på bergkross med färsk yta och det kommer behövas en övervakning för hur väl biofilmen etablerar sig över bergkross korn, och av vilken sammansättning är mest gynnsam för faunan.

Porositeten är 4,6% lägre, och antyder att det organiska materialet fyller ut porutrymmet hos materialet. Den effektiva diametern på d_{10} för ympgrus är 0,22 mm, vilket är 0,09 mm mindre än för otvättad sand och 0,08 mm mindre än för tvättad sand. I sin tur kommer det att påverka metoderna som använts för att bestämma hydraulisk konduktivitet, i vilket d_{10} , d_{60} och C_u är viktiga parametrar. Liknande förutsättningar bör beaktas för bergkross. Med hänsyn till organiskt tillväxt och andra utfällningar, kommer den hydrauliska konduktiviteten minska ytterligare innan materialet behöver bytas ut och rengöras i en bassäng.

Genom att analysera relationen mellan K -värdet och d_{10} , har bergkross möjligheten att uppnå likande hydraulisk konduktivitet som natursand om bergkrossmaterialet har större d_{10} än dem undersökta bergkrossproverna. Denna observation förstärks av Hanssons (2000) beskrivning av d_{10} och möjligheterna för kantiga material att fungera likt sand i en långsam filter.

6.4 Förutsättningar för bergkross som filtermedium

Resultatet från mikroskopiundersökning kan inte användas för att säkert bestämma mineralsammansättningen. Kornen i prov 1 och 2 består av vita korn som har vita striationer, vilket är ett kännetecken för plagioklas. Striationerna uppstår vid spaltytorna och är en naturlig svaghet i mineralkornensstruktur (Marshak, 2019). Prov 3 och 4 bestod mer av kalifältspat. Två slutsatser kan dras gällande nedbrytning av korn; 1. Plagioklaskorn är mer vittringsbenägen än kalifältspatkorn, 2. Ursprungsberget från prov 3 och 4 innehåller högre halt av beståndskraftiga mineral som kvarts. Detta är emellertid bara en hypotes och vi måste utföra tunnslip av alla ursprungsbergarter som bergkrossen kommer ifrån för att få en djupare förståelse av dess sammansättning.

Givetvis är bergkrossens benägenhet problematiska. Samtliga prover av bergkross har inte uppfyllt Vombverkets krav för minsta d_{10} storlek på minst 0,22 mm. Prov 2 och 4 visar d_{10} på 0,15 mm respektive 0,13 mm. Det innebär en förstoring d_{10} på minst 0,07 mm innan bergkrossmaterial kan börjar användas i Vombverket. Å andra sidan är riktlinjerna och standarderna utformade utifrån natursandens egenskaper. För att utveckla bergkrossens potential som filtermedium, behövs nya standarder baserade på bergkrossens specifika egenskaper. Organisk tillväxt på bergkrosskornen bör förutses likt ympgrus. Biofilm är nödvändig för bergkross att vara lika effektiv som natursand på att filtrera bort oönskade, skadliga organismer.

Målet med studien var att presentera bästa möjliga bergkrossmaterial som kan användas som filtermedium. Prov 2 och 4 framstår som de två huvudkandidaterna, men endast prov 4 rekommenderas som användning. Fastän prov 2 har högre hydraulisk konduktivitet som prov 4 i permeametermätningen och en större effektiv kornstorlek på 0,15 mm jämfört med 0,13 mm, gavs företräde åt prov 4 på grund av dess bättre motståndskraft mot nedbrytning bland de undersökta proverna. Dock saknas data om mineralsammansättningen för båda proven samt undersökning över hur väl biofilmer kommer att interagera med bergkrosskornen, därmed anses denna slutsats som ofullständig.

6.5 Slutsats

De undersökta bergkross är ännu inte helt kapabelt att fungera som filtermedium. Bergkrossmaterialet har lägre hydraulisk konduktivitet än natursand som används i Vombverket. Undersökta bergkrossmaterialet har också potentialen att efterlikna natursand när det gäller både effektiv kornstorlek och porositet, men flera undersökningar behövs. Flera empiriska metoder måste undersökas eller framställa en ny metod för att introducera och jämföra bergkross som alternativt filtermedium. Tvättad bergkrossmaterial från Dalby är den som anses vara mest lovande jämfört med andra testade bergkrossmaterial. Däremot behövs en effektiv kornstorlek förstoring på minst 0,09 mm för att möta Vombverkets standard. Mer undersökning bör utföras för att förstå bergkrossens geokemiska och geobiologiska egenskaper innan man går vidare med bergkross som filtermedium.

6.6 Inför framtida studier

Denna rapport skrapar endast på ytan för användning av bergkross som filtermedium. Utöver utveckling av metoder och undersökning för påverkan av packning bör även bergkrossens geokemiska och geobiologiska egenskaper undersökas. Biofilm är en viktig aspekt som gynnar rengöring av vatten, som beskrivs av Hägg & Pott (2022). Hur väl denna biofilm utvecklas på en bergkross kan vara avgörande för hur bra bergkross kommer fungera som filtermedium. Den geokemiska

aspekten är minst lika viktig. Bergkross är artificiellt producerat, och består av färsk yta. För att erhålla bra dricksvatten, är det enormt viktigt att bergkrossen inte orsakar föroreningar i grundvattnet, när färska korn först utsätts för annat tryck än sitt ursprung. Nya frågeställningar kan då dyka upp som; Vilka är avgörande faktorer för biofilm bildas på ett korn? Vilka kemiska föroreningar kan förväntas från vitting av bergkross? Om det finns kemiska föroreningar, hur bör ett vattenverk hantera det?

Tack till

Charlotte Sparrenbom, professor på Lunds Universitet och min handledare som har väglett mig i mitt skrivande och varit konstruktiv med sin feedback.

Kristoffer Hägg, forskningsledare på sydvatten som har visat Vombverket för mig och erbjudit oss proverna för att kunna utföra undersökningen.

Åsa Wallin, som har varit enorm hjälp under laborationstillfällena.

Karolina Brylka, forskare på Lunds Universitet och hjälpte mig att ställa upp mikroskopin.

Ulf Söderlund, professor på Lunds Universitet som hjälpte med att tolka bergkross kornens sammansättning.

Lydia Gustafsson, min flickvän och mastersstudent på Lunds Universitet för allt stöd med experimentutförande och granskning av rapporten.

Alla som har hjälpt mig med mitt jobb och ställde upp när jag behövde svar på allmänna frågor relaterat till arbetet.

7. Referenser

Alvarado Blohm, F.J. (2016). *Determination of hydraulic conductivities through grain-size analysis*. Master uppsats, Boston College. Boston College University Libraries. <http://hdl.handle.net/2345/bc-ir:106982>

Andersson, P. (2010). *Hydrogeological investigation for the PEGASUS project, southern Skåne, Sweden*. Geologiska institutionen, Lunds Universitet.

Bernell, L. (u.å) *The properties of moraines*. Swedish State Power Board. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Finns att hämta från www.issmge.org/publications/online-library.

Chan, S., Pullerits, K., Riechmann, J., Persson, K. M., Rådström, P., & Paul, C. J. (2018). Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). *Water Research*, 138, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.032>

Fetter, C.W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4:e up

plagan). Prentice Hall.

Ferreira, T.R., Archilha, N. L., Cássaro, F. A.M & Pires, L. F (2023). How can pore characteristics of soil aggregates from contrasting tillage systems affect their intrinsic permeability and hydraulic conductivity? *Soil and Tillage Research*, 230, 105704. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105704>

Gustafsson, A.M. (1983). *Moränstruktur och hydraulisk konduktivitet*. Geohydrologiska förskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola.

Hansson G. (2000). *Konstgjord grundvattenbildning. 100-årig teknik inom svensk dricksvattenförsörjning*. VA-FORSK Rapport 2000:5

Hussain, F., & Nabi, G. (2016). Empirical formulae calculation for hydraulic conductivity determination based on grain size analysis. *Pyrex Journal of Research in Environmental Studies*, 3(3), 026-032. <http://www.pyrexjournals.org/pjres>

Hägg, K., & Pott, B.-M (2022). Filter media for basin infiltration: a case study. *Water practice & Technology*, 17(7), 1505. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.074>

Lagerblad, B., Westerholm, M., & Gram, H.-E. (2011). *Bergkross som ballast i betong*. CBI Betonginstituttet och Cements AB. <https://www.researchgate.net/publication/265349713>

Larsson, R. (2008) *Jords egenskaper*. (5:e utgåvan). Statens Geotekniska Institut.

Marshak, S. (2019). *Earth: Portrait of a planet*. (6:e upplagan). W.W. Norton & Company.

Sparrenbom, C., & Jeppsson, H. (Red.). (2022). *Grundvattenboken*. Studentlitteratur.

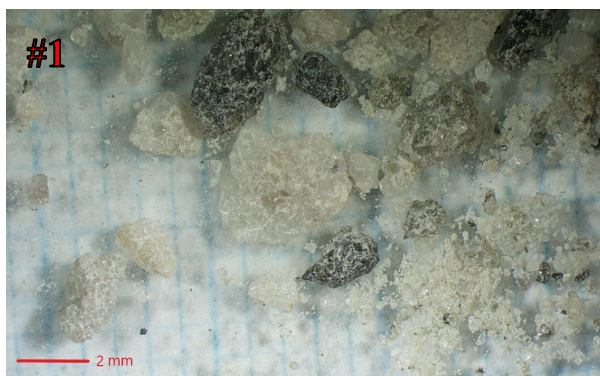
Svensktvatten. Dricksvattenfakta. Senaste uppdaterad 6 juni 2021. Hämtad 18 maj 2024, från <https://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/dricksvat-tenfakta/>

Svensson, A. (2014). *Estimation of hydraulic conductivity from grain size analysis: A comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Västlänken*. Masteruppsats, Chalmers Teknologiska Universitetet, Sverige.

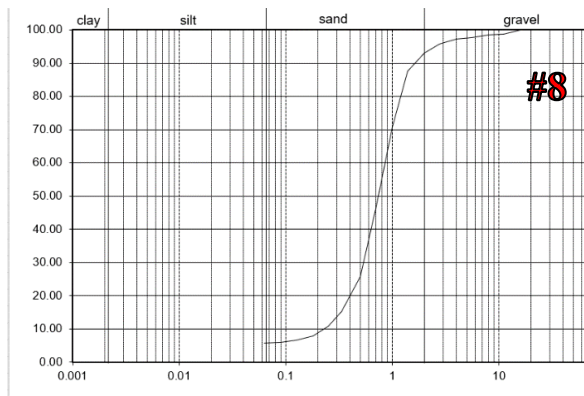
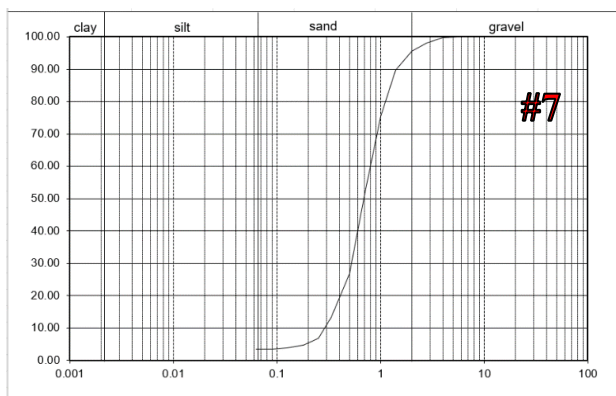
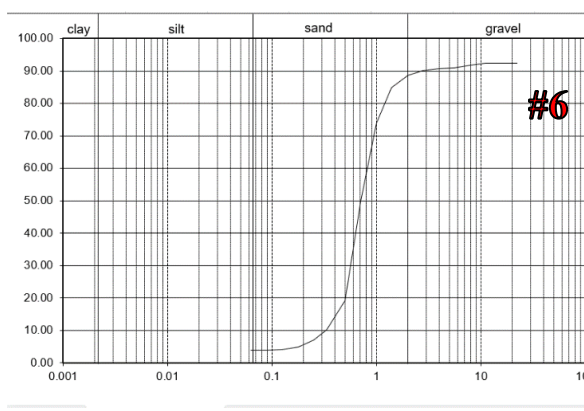
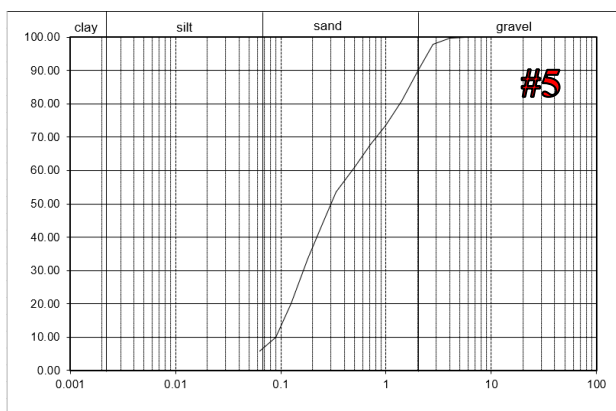
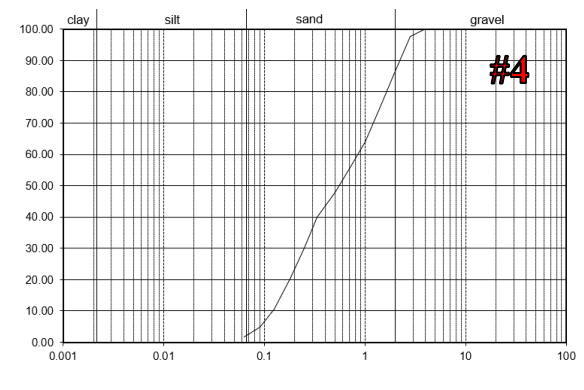
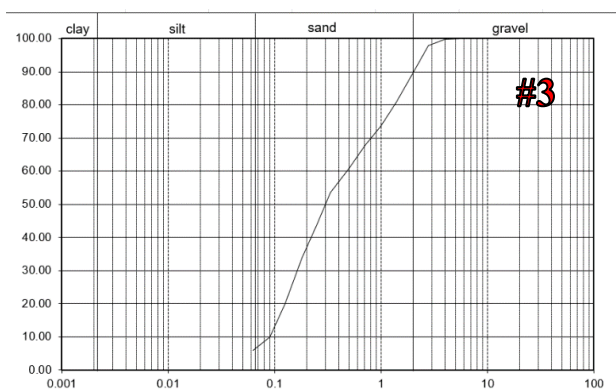
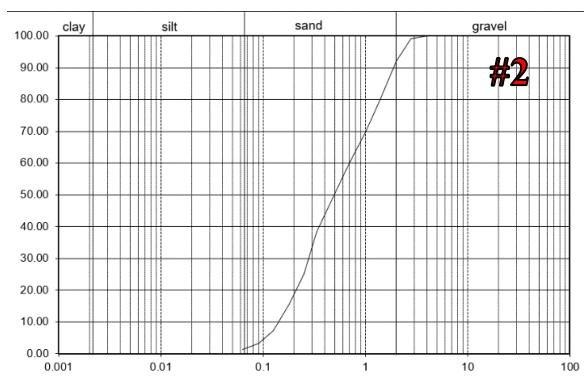
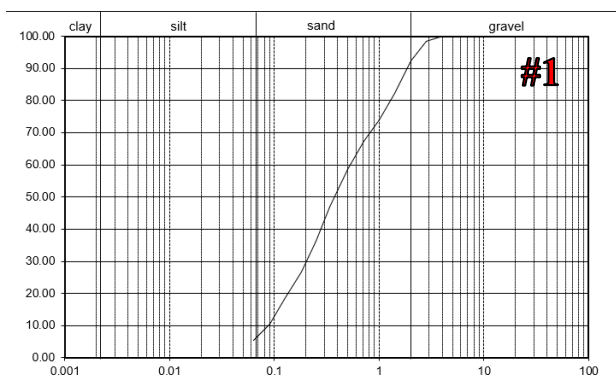
Sydvatten (2023). *Verkprocesser*. Sydsvatten AB.

Todd, D.K. (1959). *Groundwater hydrology*. (2:a upplagan). Wiley & Sons.

Appendix A, bilder från mikroskopering



Appendix B, Siktcurvor från KORNSTOR.xls



Appendix C, siktanalysresultat

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2		0.00	0.00	100.00
8		0.00	0.00	100.00
5.6		0.00	0.00	100.00
4		0.00	0.00	100.00
2.8	7.1	1.42	1.42	98.58
2	31.5	6.31	7.74	92.26
1.4	50.1	10.04	17.77	82.23
1	41.4	8.30	26.07	73.93
0.71	33.4	6.69	32.76	67.24
0.5	43.8	8.78	41.54	58.46
0.355	58.4	11.70	53.24	46.76
0.25	51.8	10.38	63.62	36.38
0.18	47.9	9.60	73.22	26.78
0.125	42.8	8.58	81.80	18.20
0.09	38.3	7.68	89.48	10.52
0.063	25.6	5.13	94.61	5.39
siktboten	26.82			
borttvättat material	0.1			
material < 0,063	26.92			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2		0.00	0.00	100.00
8		0.00	0.00	100.00
5.6		0.00	0.00	100.00
4		0.00	0.00	100.00
2.8	4.5	0.90	0.90	99.10
2	35.5	7.13	8.04	91.96
1.4	59.1	11.87	19.91	80.09
1	51.8	10.41	30.32	69.68
0.71	45.7	9.18	39.50	60.50
0.5	51.1	10.27	49.77	50.23
0.355	58.9	11.83	61.60	38.40
0.25	65.9	13.24	74.84	25.16
0.18	47.8	9.60	84.45	15.55
0.125	42	8.44	92.89	7.11
0.09	19.9	4.00	96.89	3.11
0.063	9.5	1.91	98.79	1.21
siktboten	6			
borttvättat material	0			
material < 0,063	6			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2		0.00	0.00	100.00
8		0.00	0.00	100.00
5.6		0.00	0.00	100.00
4	1.1	0.22	0.22	99.78
2.8	9.2	1.85	2.08	97.92
2	40.5	8.16	10.24	89.76
1.4	43.9	8.85	19.09	80.91
1	36	7.26	26.34	73.66
0.71	28.8	5.80	32.14	67.86
0.5	34.3	6.91	39.06	60.94
0.355	36.9	7.44	46.49	53.51
0.25	47.1	9.49	55.99	44.01
0.18	51.3	10.34	66.32	33.68
0.125	68.1	13.72	80.05	19.95
0.09	49.8	10.04	90.08	9.92
0.063	19.7	3.97	94.05	5.95
siktboten	29.2			
borttvättat material	0.3			
material < 0,063	29.5			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2		0.00	0.00	100.00
8		0.00	0.00	100.00
5.6		0.00	0.00	100.00
4	0.6	0.12	0.12	99.88
2.8	7.9	1.60	1.72	98.28
2	30.9	6.24	7.96	92.04
1.4	55.3	11.17	19.13	80.87
1	52.9	10.69	29.82	70.18
0.71	40.9	8.26	38.08	61.92
0.5	32.2	6.51	44.59	55.41
0.355	32.3	6.53	51.11	48.89
0.25	33.7	6.81	57.92	42.08
0.18	38.2	7.72	65.64	34.36
0.125	53.7	10.85	76.48	23.52
0.09	45.9	9.27	85.76	14.24
0.063	33.7	6.81	92.57	7.43
siktboten	36.7			
borttvättat material	0.1			
material < 0,063	36.8			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > c	summa-% < d
22.4	26.9	7.64	7.64	92.36
16		0.00	7.64	92.36
11.2		0.00	7.64	92.36
8	2.2	0.62	8.26	91.74
5.6	2.7	0.77	9.03	90.97
4	0.8	0.23	9.26	90.74
2.8	2.6	0.74	10.00	90.00
2	5.1	1.45	11.45	88.55
1.4	12.8	3.64	15.08	84.92
1	38.6	10.96	26.04	73.96
0.71	84.6	24.03	50.07	49.93
0.5	108	30.67	80.74	19.26
0.355	31.8	9.03	89.78	10.22
0.25	11.3	3.21	92.98	7.02
0.18	7.3	2.07	95.06	4.94
0.125	2.8	0.80	95.85	4.15
0.09	0.9	0.26	96.11	3.89
0.063	0.5	0.14	96.25	3.75
siktboten	1			
borttvättat material	12.2			
material < 0,063	13.2			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2		0.00	0.00	100.00
8		0.00	0.00	100.00
5.6		0.00	0.00	100.00
4	0.7	0.23	0.23	99.77
2.8	5.2	1.67	1.90	98.11
2	7.9	2.54	4.44	95.56
1.4	18.3	5.89	10.33	89.67
1	44.6	14.35	24.69	75.31
0.71	72.2	23.24	47.92	52.08
0.5	78.8	25.36	73.29	26.71
0.355	41.8	13.45	86.74	13.26
0.25	19.9	6.40	93.14	6.86
0.18	6.6	2.12	95.27	4.73
0.125	3.1	1.00	96.27	3.73
0.09	1	0.32	96.59	3.41
0.063	0.3	0.10	96.68	3.31
siktboten	0.5			
borttvättat material	9.8			
material < 0,063	10.3			

korstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d
22.4		0.00	0.00	100.00
16		0.00	0.00	100.00
11.2	3.9	1.17	1.17	98.83
8	1.2	0.36	1.53	98.47
5.6	2.3	0.69	2.21	97.79
4	1.8	0.54	2.75	97.25
2.8	4.8	1.44	4.19	95.81
2	9	2.69	6.88	93.12
1.4	18.8	5.63	12.51	87.49
1	55.8	16.70	29.20	70.80
0.71	79.5	23.79	52.99	47.01
0.5	71.3	21.33	74.33	25.67
0.355	34.8	10.41	84.74	15.26
0.25	14.8	4.43	89.17	10.83
0.18	9.7	2.90	92.07	7.93
0.125	4.9	1.47	93.54	6.46
0.09	1.7	0.51	94.05	5.95
0.063	0.9	0.27	94.31	5.69
siktboten	2.5			
borttvättat material	16.5			
material < 0,063	19			

Tidigare skrifter i serien ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

642. Sundberg, Melissa, 2022: Paleontologiska egenskaper och syreisotopsutveckling i borrhårkärnan Limhamn-2018: Kopplingar till klimatförändringar under yngre krita. (15 hp)
643. Bjermo, Tim, 2022: A re-investigation of hummocky moraine formed from ice sheet decay using geomorphological and sedimentological evidence in the Vomb area, southern Sweden. (45 hp)
644. Halvarsson, Ellinor, 2022: Structural investigation of ductile deformations across the Frontal Wedge south of Lake Vättern, southern Sweden. (45 hp)
645. Brakebusch, Linus, 2022: Record of the end-Triassic mass extinction in shallow marine carbonates: the Lorüns section (Austria). (45 hp)
646. Wahlquist, Per, 2023: Stratigraphy and palaeoenvironment of the early Jurassic volcanoclastic strata at Djupadalsmölla, central Skåne, Sweden. (45 hp)
647. Gebremedhin, G. Gebreselassie, 2023: U-Pb geochronology of brittle deformation using LA-ICP-MS imaging on calcite veins. (45 hp)
648. Mroczek, Robert, 2023: Petrography of impactites from the Dellen impact structure, Sweden. (45 hp)
649. Gunnarsson, Niklas, 2023: Upper Ordovician stratigraphy of the Stora Sutarve core (Gotland, Sweden) and an assessment of the Hirnantian Isotope Carbon Excursion (HICE) in high-resolution. (45 hp)
650. Cordes, Beatrix, 2023: Vilken ny kunskap ger aDNA-analyser om vegetationsutvecklingen i Nordeuropa under och efter Weichsel-istiden? (15 hp)
651. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2023: Palaeocolour, skin anatomy and taphonomy of a soft-tissue ichthyosaur (Reptilia, Ichthyopterygia) from the Toarcian (Lower Jurassic) of Luxembourg. (45 hp)
652. Kryffin, Isidora, 2023: Exceptionally preserved fish eyes from the Eocene Fur Formation of Denmark – implications for palaeobiology, palaeoecology and taphonomy. (45 hp)
653. Andersson, Jacob, 2023: Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering. En undersökning av Mars främsta ytdateringsmetod ”Crater Counting”. (15 hp)
654. Sundberg, Melissa, 2023: A study in ink – the morphology, taphonomy and phylogeny of squid-like cephalopods from the Jurassic Posidonia Shale of Germany and the first record of a loli-gosepiid gill. (45 hp)
655. Häggblom, Joanna, 2023: En patologisk sjöilja från silur på Gotland, Sverige. (15 hp)
656. Bergström, Tim, 2023: Hur gammal är jordens inre kärna? (15 hp)
657. Bollmark, Viveka, 2023: Ca isotope, oceanic anoxic events and the calcareous nannoplankton. (15 hp)
658. Madsen, Ariella, 2023: Polycykliska aromatiska kolväten i Hanöbuktens kustnära sediment - En sedimentologisk undersökning av vikar i närhet av pappersbruk. (15 hp)
659. Wangritthikraikul, Kannika, 2023: Holocene Environmental History of Warming Land, Northern Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
660. Kurop, Anna, 2023: Reconstruction of the glacier dynamics and Holocene chronology of retreat of Helagsglaciären in Central Sweden. (45 hp)
661. Frisendahl, Kajsa, 2023: Holocene environmental history of Washington Land, NW Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
662. Ryan, Cathal, 2023: Luminescence dating of the late Quaternary loess-palaeosol sequence at Velika Vrbica, Serbia. (45 hp)
663. Lindow, Wilma, 2023: U-Pb datering av zirkon i metasediment tillhörande Stora Le-Marstrand, SV Sverige. (15 hp)
664. Bengtsson, Kaisa, 2023: Geologisk karaktärisering av den kambriska Faluddensandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring. (15 hp)
665. Granbom, Johanna, 2023: Insights into simple crater formation: The Hummeln impact structure (Småland, Sweden). (45 hp)
666. Jonsson, Axel, 2023: Datering av vulkanen Rangitoto, Nya Zeeland, genom paleomagnetiska analysmetoder. (15 hp)
667. Muller, Elsa, 2023: Response of foraminifera *Ammonia confertitesta* (T6) to ocean acidification, warming, and Deoxygenation An experimental approach. (45 hp)
668. Struzynska, Patrycja, 2023: Petrography, geochemistry, and origin of deep magmatic cumulates in the Canary Islands – the xenolith record. (45 hp)
669. Krätzer, Tobias, 2023: Artificiella torskrev i Hanöbukten: Förstudie. (15 hp)
670. Khorshidian, Farid, 2023: 3D modelling and resistivity measurements for hydrogeological assessments in the northern part of Vombsänkan.

- (45 hp)
671. Sundberg, Oskar, 2023: Methodology for Stored Heat "Heat In Place" (HIP) assessment of geothermal aquifers – Exemplified by a study of the Arnager Greensand in SW Scania. (45 hp)
672. Haraldsson, Emil, 2023: Kan akademien hjälpa industrin utveckla mer robusta grundvattenmodeller? En studie av moderna Svenska industriframtagna grundvattenmodeller. (15 hp)
673. Barabas, Ricky, 2024: Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar? (15 hp)
674. Nilsson, Sebastian, 2024: The glaciotectionic evolution of Ven, Sweden: insights from a comprehensive structural, sedimentological, and geomorphological analysis. (45 hp)
675. Brotzen, Olga M., 2024: A new Lagerstätte-like fossil assemblage from the early Silurian of Mösseberg, Sweden. (45 hp)
676. Eng, Simon, 2024: Precursors to the South Atlantic Anomaly - Magnetic field variations in Lake Eilandvlei, South Africa. (45 hp)
677. Husén, Simon, 2024: Structural Geological Model of the Kaunisvaara Mining District, Norrbotten, Sweden. (45 hp)
678. Hjalmarsson, Tilda, 2024: Det underkambriska problematiska fossilet *Spatangopsis* - Vad är dess verkliga affinitet? (15 hp)
679. Kuberna, Marcos, 2024: En litteraturstudie om klorparaffiner i grundvattnet och dess implikationer på hälsa och miljö. (15 hp)
680. Persson, Viktor, 2024: Litteraturstudie: HIMU ursprung och framtid. (15 hp)
681. Selin, Sigrid, 2024: Hur kan paleoekologiska studier hjälpa oss att bättre förstå hur de ekosystem vi anser skyddsvärda har formats och hur de bör vårdas? (15 hp)
682. Rey, August, 2024: Isrörelser och havstransgressioner speglade i Kåsebergåsen. (15 hp)
683. von Vultée, Anton, 2024: Babets kvarlevor - En morfologisk och sedimentologisk undersökning av överspolnings sediment vid Tobisvik, Simrishamn. (15 hp)
684. Olsson Roso, Céline, 2024: Fåglarnas ursprung och tidiga utveckling. (15 hp)
685. Nawrocki, Bartosz, 2024: Karakterisering av Cr-spinell i den ordoviciska Lokaformationen vid Skultorps stenbrott, Billingen. (15 hp)
686. Rydh, Alexander, 2024: Unraveling Magnetic Anomalies: A Study of Earth's Field Asymmetries during the Laschamps Excursion. (15 hp)
687. Svensson, Ludvig, 2024: Echoes of impact: A petrographic analysis and classification of impact breccias from Hummeln, Sweden. (15 hp)
688. Pålsson, Malin, 2024: Detektion av utsläppsplymer med avancerat ekolod – Undersökning av utsläpp av avloppsvatten från pappersbruk i havet med EK80, CTD & filmmaterial. (15hp)
689. Ivanovic, Edwin, 2024: Går det att se echinodermernas utveckling och diversifiering under ordovicium i tunnslip? (15 hp)
690. Blomvall, Marlene, 2024: Analys av morfologi, beteende och tafonomi hos ett exceptionellt bevarat fågelfossil från Furformationen (eocen), Danmark . (15 hp)
691. Elfström, Dari, 2024; Geomorfologisk studie av Jezerokraterns kant (Mars): Potentiella mekanismer bakom kraterkantens nuvarande utseende. (15 hp)
692. Andersson, Jacob, 2024: The Cerithium limestone Member at Stevns Klint reflecting the carbonate production recovery after the K/Pg mass-extinction. (45 hp)
693. Adler, Linus, 2024: Petrografisk pilotstudie av en högmetamorf epidotrik bergart från Harbak, västra gnejsregionen i Norge. (15 hp)
694. Fält, Smilla, 2024: Dateringsmetoder för terrestiska nedslagskratrar med fokus på Siljan. (15 hp)
695. Kowal Johnson, Gloria, 2024: Traces of industrialization in a Baltic Sea sediment core with particular emphasis on marine traffic in Bornholmshavet. (15 hp)
696. Riad, Musa, 2024: Bergkross som filtermedium i artificiell infiltration. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund