



CHALMERS

Utveckling av hydrologisk kunskap kring gröna tak

En studie av samband mellan granulära materials avrinningsförmåga och dess fysikaliska egenskaper

Kandidatarbete inom samhällsbyggnadsteknik

Parsa Ariaman
Simon Goya
David Edlund
Ann-Christina Kicki Kuang

INSTITUTIONEN FÖR Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021

Utveckling av hydrologisk kunskap kring gröna tak

En studie av samband mellan granulära materials avrinningsförmåga
och dess fysikaliska egenskaper

Parsa Ariaman
Simon Goya
David Edlund
Ann-Christina Kicki Kuang



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Utveckling av hydrologisk kunskap kring gröna tak
En studie av samband mellan granulära materials avrinningsförmåga och dess fysikaliska egenskaper

Parsa Ariaman
Simon Goya
David Edlund
Ann-Christina Kicki Kuang

© Parsa Ariaman
© Simon Goya
© David Edlund
© Ann-Christina Kicki Kuang, 2021.

Handledare: Angela Sasic Kalagasidis, institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Examinator: Ingemar Segerholm, institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Kandidatarbete 2021
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg

Tryckt av Chalmers serviceavdelning
Göteborg, Sverige 2021

Förord

Detta kandidatarbet om 15 hp utgör en avslutande del av kandidatexamen på Maskinteknik, civilingenjör på Chalmers tekniska högskola. Arbetet *Dare2Test gröna tak* utfördes under vårterminen 2021 och gavs ut av institutionen för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, inom forskningsområde byggnadsteknologi på Chalmers tekniska högskola. Vi i gruppen, som består av består av David Edlund, Simon Goya, Parsa Ariaman och Ann-Christina Kuang, skulle vilja säga stort tack till våra handledare Angela Sasic Kalagasidic som har stöttat oss i arbetet under våren. Dessutom vill vi tacka Reine Norberg, Jan Bragee och Göran Stigler i Prototyp-labbet som har hjälpt oss med att bygga experimentställningen och därmed gjort det möjligt för vår grupp att kunna utföra mätningar av olika avrinningsförlopp.

Development of hydraulic theory around green roofs

A study on correlations between runoff delay of granular materials and their physical properties

Abstract

Growing cities and forthcoming climate changes set greater demands on stormwater management in urban and densely built environments. Stormwater has become an increasingly demanding issue in larger communities, which in turn entails a growing need for alternative solutions to the stormwater problem. Hence the need for a project within the topic of *green roofs* with the goal of increasing knowledge in stormwater management. This is the basis for the project *Dare2Test gröna tak* of Chalmers University of Technology.

The project was based on a premise given by the supervisor Angela Sasic, as this bachelor thesis aims to increase understanding and knowledge around the theory behind green roofs. This was achieved by examining granular materials and their physical properties, as well as testing its ability to delay water runoff. A completely new experimental setup was built in order to be able to perform measurements on drainage capacity. In addition, a wide range of materials with different physical properties were selected for the experiments.

Initially, a literature study was conducted on green roofs and stormwater management. Thus, the properties of various physical laws in fluid theory, hydrology and hydrogeology were mapped, where among other things, Darcy's law and hydraulic conductivity were central theoretical elements that laid the foundation for the next step. Subsequently, experimental hydraulic conductivity tests using the *falling head method* were performed, which measured water drainage velocity on different materials. The experiments were performed in repeated rounds, where each selected material was tested individually. Furthermore, the possibility of combining different materials to measure the runoff speed was implemented. The goal was to find satisfactory combinations of materials that could delay runoff the longest.

This resulted in different values for hydraulic conductivity, bulk density, bulk porosity and grain size for each material. By analyzing how the different parameters seemed to affect each other, it became apparent that the order of importance was grain size, porosity and lastly density. Also, mixing of materials resulted in encouraging effects. Mixing an organic material with relatively large grain size, like orchid soil, with a smaller unorganic material like expanded polystyrene (EPS) balls, the resulting hydraulic conductivity was lower than each of them individually. All values for hydraulic conductivity (K) (m/s) were then converted to volumetric flow rate (Q) (m^3/s) by multiplying with the cross sectional area of the experiment cylinder, and plotted in diagrams for visual representation.

In summary, it's obvious that further testing needs to be done. The obtained results in this project lays a good groundwork for testing of more materials, mixtures and physical properties. Also, there was a large number of error sources around the experimental setup that could be reduced to possible good effect.

Sammandrag

Växande städer och en stundande klimatomställning ställer större krav på dagvattenhantering i urbana och tätbyggda miljöer. Dagvatten har blivit en allt mer viktig fråga i större samhällen och medför av denna anledning ett tilltagande behov av alternativa lösningar för hantering av dagvatten. Därav behovet av att ett projekt inom forskningsområdet *gröna tak*, med mål att öka kunskapen inom dagvattenhantering. Detta ligger till grund för projektet *Dare2Test gröna tak* på Chalmers tekniska högskola.

Projektet utgick från en given premiss av handledaren Angela Sasic, då detta kandidatarbete syftar på att öka förståelse och kunskap om teorin bakom gröna tak. Detta uppnådes genom att undersöka granulära material och dess fysikaliska egenskaper, samt testa dess förmågor att fördröja vattenavrinning. En ny experimentställning byggdes för att kunna utföra mätningar på avrinningsförmåga och ett brett sortiment av material med olika fysikaliska egenskaper valdes sedan ut till experimenten.

Inledningsvis utfördes det en litteraturstudie inom områdena gröna tak och dagvattenhantering. Därmed kartlades egenskaper hos olika fysikaliska lagar inom strömningslära, hydrologi och hydrogeologi, där bland annat Darcys lag och hydraulisk konduktivitet var centrala teoretiska delar som la grunden för nästa steg. Därefter utfördes experimentella tester av hydraulisk konduktivitet med hjälp av en metod vid namn *falling head*, där vattnetsavrinningshastighet mättes på olika material. Experimenten utfördes i upprepande omgångar, där varje valt material testades individuellt. Vidare utforskades möjligheten att kombinera olika material. Målet var att hitta optimala kombinationer av material som kunde fördröja avrinningen så mycket som möjligt.

Detta arbete resulterade i diverse data på hydraulisk konduktivitet, bulkdensitet, bulkporositet och kornstorlek. Genom att analysera hur olika parametrar påverkar varandra blev det tydligt att kornstorlek hade störst inverkan, följt av porositet och sist densitet. Dessutom gav blandningar av material god effekt. Genom att blanda ett större organiskt material, som orkidéjord, med ett mindre oorganiskt material, så som kulor av expanderad polystyren (EPS), så erhöles en hydraulisk konduktivitet som var lägre än vad båda materialen presterade individuellt. Samtliga värden på hydraulisk konduktivitet (K) (m/s) omvandlades sedan till volymflöden (Q) (m^3/s) genom multiplicering med experimentcylinderns tvärsnittsarea, och plottades slutligen i diagram för visuell presentation.

Sammanfattningsvis så är det tydligt att vidare tester behövs genomföras. Erhållna data lägger en god grund för framtida tester av fler material, blandningar och fysikaliska egenskaper. Där fanns dessutom en stor mängd möjliga felkällor kring experimenten som sannolikt skulle kunna reduceras till god effekt.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Frågeställning	2
1.4	Avgränsningar	3
2	Teori	4
2.1	Hydrologi	4
2.1.1	Infiltration	4
2.1.2	Ytavrinning	4
2.2	Hydrogeologi	5
2.2.1	Darcys lag	5
2.2.2	Permeabilitet	6
2.2.3	Hydraulisk konduktivitet	7
2.2.4	Porositet	7
2.2.5	Validitet av Darcys lag	8
2.3	Experiment	8
2.3.1	Falling head	9
3	Metod	11
3.1	Utrustning och material	11
3.1.1	Experimentställning	11
3.1.2	Testmaterial	14
3.2	Genomförande	15
3.2.1	Litteratursökning	15
3.2.2	Mätning av hydraulisk konduktivitet	15
3.2.3	Mätning av densitet och porositet	16
3.2.4	Konkretisering av resultat	17
4	Resultat	18
4.1	Oorganiskt material	18
4.1.1	Polyetenplast (PE)	18
4.1.2	Expanderad polystyren (EPS)	19
4.1.3	Hollow balls (HB)	20
4.2	Organiskt material	20
4.2.1	Lecakulor	20
4.2.2	Blomjord	21
4.2.3	Orkidéjord	21
4.3	Blandningar	22
4.3.1	Blomjord och EPS 1	22
4.3.2	Orkidéjord och EPS 1	23
4.3.3	Orkidéjord och PE (4-5)	23
4.4	Porositet och densitet	23
5	Diskussion	25

5.1	Metoddiskussion	25
5.1.1	Ställningens felkällor	25
5.1.2	Experimentens felkällor	26
5.1.3	Val av experiment	28
5.2	Resultatdiskussion	28
6	Slutsats	33
	Referenser	34
A	Detaljbilder på slutgiltig experimentställning	38
B	Bilder på testmaterial	42
C	Samtliga oorganiska resultat	45
D	Samtliga organiska resultat	50
E	Samtliga resultat från blandningar	53
F	Samtliga resultat från tester av densitet och porositet	56
G	Diagram för omättade tester	57

1 Inledning

Dagvatten, alltså regn som rinner ner från takytor eller dylikt till gator och vägar, har blivit ett allt mer vanligt problem i takt med ökad urbanisering och befolkningstillväxt i stora städer (RISE, n.d.). Översvämningar på grund av skyfall har lett till stora skador på infrastruktur. Vegetationsbeklädda tak, även benämnda gröna tak, anses vara en alternativ lösning för att uppnå fördröjning och hantering av dagvatten i tätbyggda områden (Pettersson m. fl., 2018). Trots kännedom om denna lösning saknas fortfarande kompletta verktyg för att dimensionera gröna tak.

1.1 Bakgrund

I takt med en stark global befolkningstillväxt ökar även urbaniseringsgraden, vilket medför stora påfrestningar på dagvattensystemen. Förtätning av urbana miljöer i kombination med oförutsägbara klimatförändringar och kraftigare skyfall har resulterat i en ökad risk för översvämningar (SMHI, 2021). Stora belastningar i ledningsnätens dagvattenhantering har förorsakats av en stadsmiljö med allt fler hårda ytor och färre gröna områden, där regnvatten fått sämre förutsättningar att rinna ned till grundvattnet (RISE, 2021). En ökad förekomst av översvämningar leder till allt större samhällskostnader i form av skador på bebyggelse och vattenföroreningar.

För att klara av en mer intensiv urbanisering och ökad årsmedelnederbörd behöver dagvattenhanteringen i städer utvecklas. Ombyggnationer av befintliga ledningsnät är dessvärre en mycket omfattande och kostsam process, vilket är varför alternativa lösningar efterfrågas. På senare år har fokus därför riktats på en mer lokal vattenfördröjning och långsam avledning av dagvattnet. Enligt Naturvårdsverket (2020) bör städer planeras utifrån en hållbar dagvattenhantering där mark och bebyggelse utformas i syfte att hantera vattenmassorna på plats med hjälp av tekniska och naturbaserade lösningar. I takt med den ökade förståelsen för dagvattensystemens nuvarande samt stundande brister har det blivit allt vanligare med gröna tak.

Gröna tak ses idag som ett alternativ till att avlasta befintliga lokala ledningsnät. Genom att täcka hela eller delar av taken med ett tunt jordskikt i kombination med vegetation kan regnvattensflödet fördröjas och reduceras. Fler gröna tak innebär färre outnyttjade urbana ytor och den ökade vattenabsorbtionen medför minskad vattenavrinning. Ett planeringsverktyg som används flitigt för beräkna mängden grönska i bland annat urbana miljöer är den så kallade grönytefaktorn, vilket är ett

mått på andelen ekoeffektiv yta i ett område (Boverket, n.d.). Grönytefaktor är ett exempel på en samhällelig aspekt som har blivit mer och mer viktig under senare år, och som i många städer används som ett krav i stadsplanering. Malmö är ett exempel på en stad som med stort fokus på grön infrastruktur lyckats avlasta det lokala dagvattensystemet (SLU, 2019).

I dagsläget saknas adekvat teknisk information för gröna taksystems verkliga prestanda (Pettersson m. fl., 2018). Avsaknaden av teknisk information försvårar stadsplaneringen vid dimensionering av gröna tak då den teoretiska vattenfördröjningskapaciteten inte är konkret fastställd. Regnintensitet, takets lutning, jordskiktets tjocklek och jordskiktets sammansättning är några faktorer som påverkar takets avrinningsförlopp. Genom att utforska hydrogeologin bakom jordlagrens egenskaper finns möjlighet till att optimera sammansättningsvattenhållningsförmåga och på så sätt utnyttja takens begränsade yta till fullo. Denna typ av information skulle ge en helhetsbild över takens faktiska betydelse med avseende på vattenfördröjning.

1.2 Syfte

Kandidatarbetet syftar till att undersöka olika materialtillsatser hydrogeologiska egenskaper och deras inverkan på vattenfördröjning vid praktisk tillämpning av gröna tak. Befintliga beräkningsverktyg för utformning av gröna tak är kraftigt begränsade på grund av störningsvariabler och systematiska mätfel. I dagsläget krävs tidsödande experimententering för att korrigera den felaktiga datan. Jordlagrets fysikaliska egenskaper har stor inverkan på dess vattengenomsläpplighet (permeabilitet) och vattenhållande förmåga (kapillaritet).

Genom att finna ett samband mellan lättillgängliga fysikaliska egenskaper av jordarter och annat granulärt material skulle behovet av tidskrävande experiment minska. Målet är därför att med hjälp av laborativa försök öka kunskapen om material som kan appliceras i sammansättningar på gröna tak. Detta kan uppnås genom att fastställa vad bland annat densitet, porositet och partikelstorlek har för inverkan på jordlagrets vattenavrinningsfördröjning.

1.3 Frågeställning

Projektet syftar specifikt till att beskriva den fysikaliska samverkan mellan material och vatten, där utgångspunkten är att utforska hydrogeologin bakom olika samman-

sättningar och dess hydrauliskt konduktivitet i gröna tak.

Följande frågeställningar avses besvaras under projektets gång:

- Hur fördröjs avrinningsförloppet i olika granulära material?
- Vilken roll spelar materialets egenskaper så som densitet, porositet och kornstorlek?
- Hur påverkas avrinningsförloppet då material med olika egenskaper kombineras?

1.4 Avgränsningar

Det finns flera aspekter och forskningsrområden inom ämnet gröna tak. Exempelvis skiljer sig gröna tak vars enda syfte är att skapa estetiskt tilltalande miljö mot gröna tak vars syfte är dagvattenhantering (Skog, Malmberg, Emilsson, Jägerhök, & Capener, 2017). I detta arbete behandlas den aspekt av gröna tak som strikt berör dagvattenhantering. Följaktligen läggs minimalt fokus på det gröna takets förutsättningar för biodiversitet, vegetation och utseende. Avgränsningen medför breddad möjlighet till materialanvändning då biologiska faktorer kan försummas.

Arbetet är baserat på experimentella mätningar där laborationerna sker inomhus, vilket inte speglar verkliga klimatförhållanden. En suboptimal avbildning av klimatförhållandet resulterar i att vind, avdunstning på grund av sol, värme och vindtorkning inte mäts i projektet. Regn är ett naturligt fenomen som ej kommer kunna efterliknas fullt ut genom laboration, då gruppen endast har tillgång till inadekvata munstycken vilka kommer att användas till att sprida vattnet i materialen. Det bör därför noteras att vattnets avrinningshastighet i den kontrollerade miljön avviker från hastigheter under verkliga värderförhållanden.

Samhällsetiska och etiska aspekter beaktas inte i detta arbete då huvudsakligt fokus ligger på materiella experiment i en kontrollerad labbmiljö. Det finns en framtida relevans i bägge aspekterna då experimentdata kan komma att ligga till grund för faktiska implementeringar av gröna tak, varpå exempelvis mänskliga faktorer och ekonomiska frågor måste beaktas. Detta anses dock vara för avlägset sett till ramarna och den grundläggande utgångspunkten för detta projekt.

2 Teori

Vid undersökningar av gröna tak är det essentiellt att beakta områden som strömningslära, hydrologi och hydrogeologi. I följande kapitel behandlas den icke-systematiska litteraturgenomgången som gjorts i syfte att skapa förståelse för väsentliga begrepp och koncept. Nedan presenteras ett fundamentalt teoretiskt ramverk som vetenskapligt beskriver gröna taks profil med avseende på funktion och syfte.

2.1 Hydrologi

Hydrologi är läran om vattnets förhållande på jorden. Terminologin innefattar cirkulation för vatten i hav, atmosfär och landsområden (Wikipedia, 2021). Gröna tak studeras inom aspekten *hydrologiska markprocesser*. Genom att studera infiltration och ytavrinning skapas förståelse kring vattnets förlopp vid avrinningsprocesser genom granulära material.

2.1.1 Infiltration

När nederbörd tränger sig in i jorden kallas det för *infiltration*. Ett sätt att kunna beskriva infiltration är genom att studera infiltrationskapacitet som beskriver en maximala vattenmängden per tidenhet (m/h). Indexet visar den mängd vatten som kan sjunka ned i marken i samband med regn, det vill säga vattnets förmåga att infiltreras i marken (Håkansson, 2000). Hur mycket vatten som absorberas i vegetationen varierar beroende på markens skikt, förhållande och sammansättning. Exempelvis är infiltrationskapaciteten betydligt lägre vid kompakta och hårda ytor till skillnad från porösa ytor.

2.1.2 Ytavrinning

Ytavrinning uppstår när ett material är helt mättat eller har en hård avrinningsyta, och vatten inte har någon annanstans att ta vägen förutom längs materialets yta. Ytavrinningen kallas även för Hortonsk avrinning och beskriver den del av vattnet som inte fastnar i vegetationen (Håkansson, 2000).

2.2 Hydrogeologi

Hydrogeologi är en interdisciplinär tvärvetenskap bestående av kunskaper och terminologier från två skilda vetenskapsgrenar; hydrologi och geologi. Hydrogeologin, även kallat grundvattenteknik, omfattar fysikalisk, biologisk, kemisk samt juridisk samverkan mellan vatten och granulärt material, exempelvis jord. Syftet med hydrogeologin är att studera vattnets rörelse i olika geologiska miljöer, med avseende på föroreningar, felzoner, kapilläritet och permeabilitet (Smith, 2015). En styrande geovetenskaplig formel som beskriver grundvattnets flödes- och lagringsegenskaper är Darcys lag (Atangana, 2018).

2.2.1 Darcys lag

Darcys lag är en konstitutiv, fenomenologiskt härledd, ekvation som beskriver flödet av en vätska genom ett poröst medium (Atangana, 2018; Christian, 2003). Ekvationen beskriver ett proportionellt samband mellan en vätskas flöde genom ett poröst medium, vätskans dynamiska viskositet, mediumets permeabilitet och trycksskillnaden i det betraktade systemet. Flöden som verkar under stationära förhållanden uttrycks med Darcys lag på följande sätt:

$$q = \frac{-k}{\mu} \Delta P \quad (2.1)$$

där q är flödesutsläppet (m/s), k är permeabilitet (m^2), ΔP är tryckgradienten (Pa/m) och μ är den dynamiska viskositeten ($Pa \cdot s$).

Utfloppet (q), även benämnt Darcys flux, definieras som volymetrisk flödes hastighet (m/s) per areaenhet (m^2) och beskriver systemets genomsnittliga utsläppshastighet; inte strömningshastigheten, vilket är vätskans genomsnittliga hastighet i relation till porerna. Vätskans hastighet (v) beskrivs istället av kvoten mellan utfloppet och mediumets porositet (ϕ) enligt följande (Alabi m. fl., 2019):

$$v = \frac{q}{\phi} \quad (2.2)$$

det totala vattenflödet (Q) definieras som volymenhet per tidsenhet (m^3/s) och erhålls genom att multiplicera tvärsnittsarean med utfloppet:

$$Q = A \cdot q \quad (2.3)$$

Till följd av Darcys lag och ekvationens matematiska uttalanden har flera objektiva sanningar relaterade till grundvattensflödet i geologiska bildningar kunnat fastställas (Atangana, 2018), varav några är:

- Det sker inget flöde över en sträcka i avsaknad av en tryckgradient; hydrostatisk jämvikt.
- Om en tryckgradient existerar uppstår flöde från högt till lågt tryck, i motsatt riktning av den ökade gradienten, ergo det negativa tecknet i Darcys ekvation.
- Ju större tryckgradienten genom ett medium är, desto större blir utflödets hastighet.
- Vätskans utflödeshastighet kan ofta variera genom olika medium eller genom samma medium, men i olika riktning, trots att tryckgradienten är densamma.

2.2.2 Permeabilitet

Inom strömningsläran definieras permeabilitet (k) som den volymenhet av en fluid som under ett tryck- och tidsenhet passerar tvärssnittet av ett medium (Wool, 2005). Permeabilitet är med andra ord ett poröst materials inneboende egenskap som avgör dess genomsläpplighet för vätskor (Alderton och Elias, 2021). Hög permeabilitet innebär därmed att en vätska eller gas snabbt kan flöda genom ett medium. SI-enheten för permeabilitet är (m^2), men en vanlig beteckning är *Darcy* (d) där $1 \text{ Darcy} \approx 10^{-12} m^2$

Ett materials permeabilitet beror främst på porositeten, men även porernas förbindelser och geometri är bidragande faktorer (Bense m. fl., 2013). *Absolut permeabilitet* betecknar permeabiliteten för ett medium med en mättnadsgrad på 100% och som endast har mättats av en typ av vätska. Absolut permeabilitet är en funktion för ett medium och dess struktur och verkar därmed oberoende från flödet.

Permeabiliteten kan, genom omskrivning av Darcys lag (ekvation 2.1), uttryckas som:

$$k = -q \frac{\mu}{\Delta P} \quad (2.4)$$

Ett mediums *mättnadsgrad* har signifikant inverkan på permeabiliteten (Kozlowski och Ludynia, 2019). Permeabiliteten ökar exponentiellt mot ökad mättnadsgrad. Det är dock viktigt att notera att det i semi-mättade medium kan uppstå luftbubblor mellan porerna, vilket reducerar permeabiliteten.

2.2.3 Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet (K) är en egenskap hos ett medium, såsom jord eller sten, som beskriver en vätskas förmåga att flöda genom dess porer (Ramkumar m. fl., 2018). Till skillnad från permeabilitet, som endast beskriver materialbäddens egenskaper, uttrycker hydraulisk konduktivitet genomsläppligheten även utifrån fluidens inneboende egenskaper. Hydraulisk konduktivitet tar hänsyn till variabler såsom vätskans viskositet, densitet, temperatur samt bäddens mättnadsgrad. Med erhållet värde på permeabilitet för ett studerat system kan hydraulisk konduktivitet beräknas av följande:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.5)$$

2.2.4 Porositet

Porositet (ϕ) definieras som förhållandet mellan porvolym och den nominella volymen av en porös kropp (Liu och Chen, 2014). Porositeten som uttrycks i procent, beskriver med andra ord tomrummet i ett material eller system. Ett systems permeabilitet beror till stor del på den *effektiva porositeten*, vilket beskriver hur sammanlänkade porerna är (Department of Jobs och Regions, n.d.). Medium med hög porositet, men dålig anslutning mellan porerna, medför därför låg permeabilitet. Porositeten kan beräknas med hjälp av följande formel:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.6)$$

där V_v är volymen tomrum och V_t är den totala volymen.

2.2.5 Validitet av Darcys lag

Det är svårt att förutspå under vilka absoluta förhållanden som appliceringen av Darcys lag är giltig. Flera forskningsstudier visar på att formelns validitet främst beror på flödets Reynoldstal, men även hydrauliskt huvud och hydraulisk konduktivitet påverkar. (White, 2015). Reynoldstal är en dimensionslös storhet inom strömningsmekanik som för flöden i porösa medium uttrycks som:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.7)$$

där ρ är vätskans densitet (kg/m^3), v är den specifika flödes hastigheten (m^3/s) och d är korndiameter på det granulära mediumet (m).

För att Darcys lag ska gälla krävs det att flödet i fråga är stabilt laminärt, det vill säga att Reynoldstalet (Re) är lägre än 1, men under särskilda förhållanden är ekvationen giltig för $Re < 10$ (Alabi, 2011; Atangana, 2018; Freeze och Cherry, 1979; Theis, 1935). De allra flesta grundvattensflöden är dessbättre långsamma, viskösa flöden med lågt Re (Atangana, 2018). Även flödessystemets geometri har stor betydelse för vid vilket Re som flödet går från laminärt till turbulent tillstånd. Det kan vara värt att notera att modifikationer av Darcys lag kan stärka validiteten för flöden med högre Re . (Wang m. fl., 2019).

För ett flöde genom ett cirkulärt rör är Re definierat av följande ekvation (White, 2015):

$$Re = \frac{W D_h}{\mu A} \quad (2.8)$$

där D_h är rörets innerdiameter (m), W är massflödet (kg/s) och A rörets tvärsnittsarea (m^2).

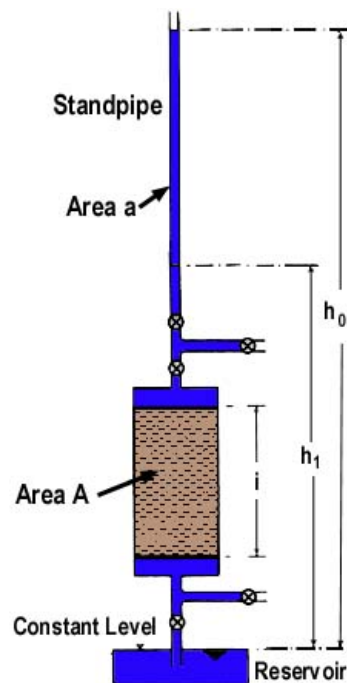
2.3 Experiment

Detta avsnitt behandlar den teori som är relevant för att testa permabilitet och hydraulisk konduktivitet för olika sammansättningar av material.

2.3.1 Falling head

Experimentet *falling head* är ett vanligt experiment som används till att mäta hydraulisk konduktivitet för ett medium. Experimentet går ut på att mäta vattnets genomrinningshastighet, se ekvation (2.10), genom att låta ett flöde med vatten rinna genom ett kort rör med granulärt material, som är ansluten till ett annat rör med vatten ovanför. Röret ovanför möjliggör mätning av h_1 och h_2 , då det går att mäta höjdskillnad i vattnet från initiering tills dess att flödet har runnit ner en viss bit efter en viss tid.

Material fylls i den undre cylindern, vatten i den övre, och sedan öppnas en ventil som låter vattnet rinna ner genom den undre cylindern och ut. Tiden $t_i - t_f$ tas från dess att ventilen öppnas tills att vattnet i övre cylindern nått en specifik referensnivå. Detta bör göras upprepande gånger och den tiden som tas bör vara samma för varje test med en variation på $\pm 10\%$ (GeotechData, 2021).



Figur 2.1: Illustration av ett typiskt system i ett falling head permeabilitetstest (GeotechData, 2021).

$$K = \frac{aL}{A(t_f - t_i)} \cdot \log_{10}\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2.9)$$

där a är arean på övre cylindern (m^2), A är arean på undre cylindern (m^2), L är

längden på den undre cylindern (m), $t_f - t_1$ är tidsintervallet från start till stopp (s), h_1 är begynnelsehöjden på vattnet i övre cylindern (mm) och h_2 är uppmätt vattennivå efter tiden har stannat.

Med hjälp av framtaget värde för hydraulisk konduktivitet som fås, kan ett volymflöde beräknas i en variant av *Darcys lag*.

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (2.10)$$

Om lutningsgradient saknas sätts $\frac{dh}{dl} = 1$.

3 Metod

I följande kapitel presenteras hur de problem som presenterades i avsnitt 1.3 löses, samt hur dessa lösningar har implementerats i praktiken. Arbetsgången preciseras i kronologisk ordning och avser huvudsakligen presentera experimentens praktiska genomföranden. Kapitlet är uppdelat i två delar; *Utrustning och material* samt *Genomförande*. Detta för att arbetet med själva experimentställningen visade sig vara av större karaktär än från början väntat, och på så vis blivit en väsentlig del av metoden.

3.1 Utrustning och material

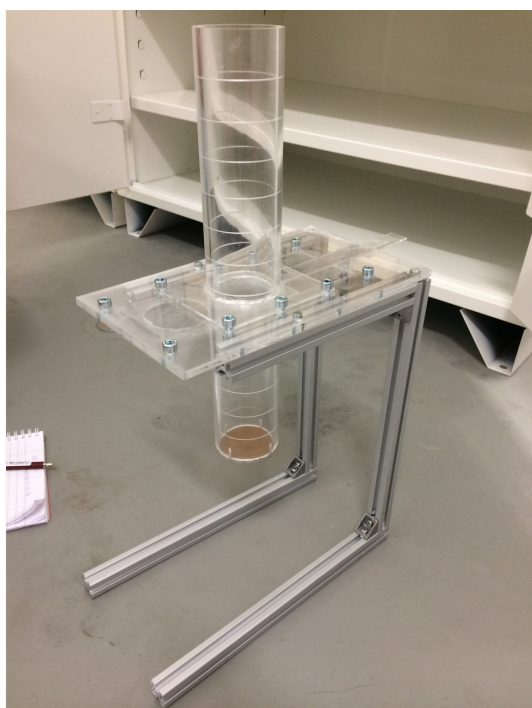
Detta avsnittet kommer behandla material, konstruktion och ingående komponenter i den specialanpassade experimentställningen, samt de olika materialblandningar som sedan testades i experimenten.

3.1.1 Experimentställning

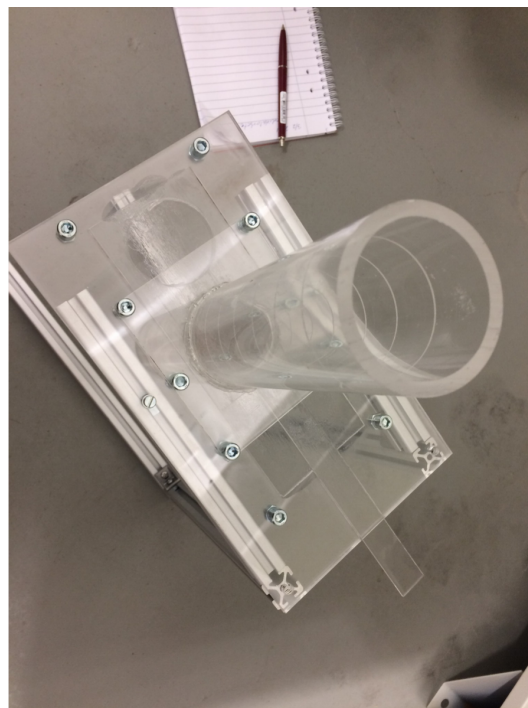
Eftersom att projektet avsåg att testa vattenflöden genom en rad olika material, behövdes ett praktiskt verktyg som kunde genomföra detta på ett tydligt och precist sätt. För just detta syfte tillhandahölls initialt en mindre experimentställning i plast, men då det visade sig att denna modell var bristfällig på flera olika punkter bestämdes det för att en ny ställning behövdes ta fram.

Den tillhandahållna ställningen, Figur 3.1 och 3.2, bestod huvudsakligen av två likadana rör á 20 cm i höjd, 60 mm ytterdiameter och 50 mm innerdiameter. Den undre och övre rören var ett och samma från början, men var kapade på mitten för att göra plats åt den slussventil som möjliggör själva funktionen. Hädanefter kommer dessa rör att benämnas som övre och undre cylinder. Slussventilen i sig bestod av två plattor, ett skruvförband och en arm mitt emellan plattorna som kunde öppna och stänga det tänkta flödet från den övre cylindern till den undre. I botten av den undre cylindern satt ett fint filter för att hålla kvar material, men släppa ut vatten. Hela ställningen var monterad på två metallben för att höja upp cylindrarna och möjliggöra plats åt en separat uppsamlingsbehållare för vattnet som rann ut undertill. För att byta material och tömma eventuellt kvarvarande vatten behövdes ställningen vändas upp och ned och alternativt även spolat i denna position för att få ut allt i botten.

Det fanns en rad olika problem med denna konstruktion. För det första var ställningen instabil då den var lätt och smal. Dessutom infann sig tyngdpunkten på en relativt hög höjd när den var fylld med material och särskilt vatten, vilket gjorde den benägen till att välta vid ovarsam hantering. Plastmaterialet var flexibelt utan att kännas segt, vilket gjorde slussarmen (som i sig var väldigt tunn) till en svag länk. Varje gång man öppnade eller stängde slussen var det en avvägning hur snabbt man vågade öppna och stänga, ifall armen skulle ge vika. Detta var problematiskt då det var viktigt ur ett experimentellt syfte att denna procedur skulle gå så snabbt som möjligt för att inte påverka tidtagningen på flödet (eller påverka flödesformen i sig). Avslutningsvis läckte ställningen vatten från skruvförbandets sidor. Detta var delvis på grund av att det inte gick att spänna åt skruvarna hur mycket som helst utan att låsa slussarmen för hårt mellan plattorna och på så sätt försvåra den funktionen ytterligare. Det epoxylim som användes runt om cylindrarnas mitt var inte tätt heller, och det var således tydligt att felkällorna skulle bli för många. Därför fattades beslutet att en ny och bättre modell var högst nödvändig för arbetets fortsatta gång.



Figur 3.1: Initial modell från sidan



Figur 3.2: Initial modell ovanifrån

Med hjälp av anställda på Chalmers Prototyplaboratorie projekterades en ny och bättre design se Figur 3.3 och 3.4, anpassad för just detta arbete. Resultatet är en större och tyngre ställning, som minimerar eller helt eliminerar många av de problem som den initiala modellen var kantad av. Den slutgiltiga ställningen är 145

cm i maxhöjd, och består av två olika (men lika) rör på ovansidan och undersidan. Det första och övre röret är 91 cm högt, 50 mm i ytterdiameter och 43.5 mm i innerdiameter och rymmer således alltså betydligt mer vatten än det förra gjorde. På detta rör sitter även en höjdskala som går från 100 till 890 mm se bilder i bilaga (A). Det andra och undre röret är den enda del som återanvänds från den initiala modellen vars mått redan är givna. Filtret i botten tilläts sitta kvar då den ansågs fylla god funktion. Vad som skiljer avsevärt ställningarna emellan är ventilsystemen. Den slutgiltiga modellen nyttjar en kulventil som enkelt kan manövreras utifrån med hjälp av en arm. Mellan ventilen och den undre cylindern sitter en ihålig fläns som inrymmer en diffusor i form av ett tunt cirkulärt metallfilter av annan sort än det i botten. Detta filter är till för att sprida vattenflödet jämnt ner i cylindern så att det inte kommer som en hård stråle rakt från kulventilens öppning. Runt detta filter sitter även en o-ring av gummi för att förhindra att vatten läcker ut från flänsens sidor. Själva flänsen sitter ihop med hjälp av ett skruvförband bestående av 6 skruvar av typ M24 och öppnas varje gång man önskar tömma eller byta material. Det räcker att korsdra två av dessa skruvar för att hålla tätt, vilket sparar tid vid materialbyte. Hela ställningen är monterad på (men kan enkelt lyftas av från) en stor och tung bockad metallram som bidrar med nödvändig stabilitet och möjliggör praktiskt samt ergonomiskt användande av den nu betydligt högre övre cylindern.



Figur 3.3: Slutgiltig modell framifrån



Figur 3.4: Slutgiltig modell från sidan

3.1.2 Testmaterial

I första hand tilldelades material till *falling head* experimentet av projektets handledare. De tilldelade materialen innefattade Polyetenplast (PE), Expanderad polystyren (EPS) och Hollow balls (HB). PE är ihålig cylinderformad plast i storlekarna 4-5 mm och 6-7 mm där intervallen indikerar inner- och ytterdiametrar. Dessa plastbitar har längderna 6 och 12 mm. EPS är ett sfäriskt format material med diametern 1 mm, respektive inom spannet 4-6mm. Hollow balls är sfäriska kulor som är ihåliga på insidan med ytterdiameter 10 mm. Syftet med dessa material var att förstå fysiken av granulära material, hur olika parametrar som geometri och storlek påverkar avrinningshastigheten. Dessa verkade även som en bra grund att börja på för att bättre förstå ställningens förmåga att utföra experiment innan arbete med mer omständiga material påbörjades. Samtliga bilder på de oorganiska materialen finns i början av bilaga B.

I senare fas av arbetet testades de organiska materialen blomjord, orkidéjord och lekakulor. Blomjord kan sägas vara vanlig klassisk finkornigt jord. Orkidéjord är en blandning av pinjebark och torv vilket innebär att det är grövre än blomsterjord på grund av barkbitarna, medan torven utseendemässigt är nära blomsterjord. Lecakulor är ett organiskt material som tillverkas genom upphettning av lera. Kulorna är ett något ojämnt sfäriskt material som varierar mellan 10-20 (+/- 5) mm i diameter. Gröna tak använder organiskt material då växtlighet kräver det och därav är det intressant att testa dessa materials hydrauliska konduktivitet. Samtliga bilder på de organiska materialen finns under den andra hälften av bilaga B, med undantag för orkidéjord som förbrukades innan bilderna togs.

Utifrån resultaten från de organiska och oorganiska materialen togs tre blandningar fram, vilka beskrivs längre ned i resultatavsnittet. Alla är tre är 50/50 blandningar baserade på volym. Dessa blandningar gjordes för att se hur sammansättningar av olika material kan visa annorlunda egenskaper relativt till när de testas individuellt och få ett bättre förståelse gällande varför skillnaderna kan uppstå.

3.2 Genomförande

Här redogörs för projektets huvudsakliga metodik; experimenten, för att nå de ut-satta målen. Avsnittet behandlar projektets genomförande, från litteratursökning och experimentutförande, till konkretisering av resultat. Utförandet av experimen-ten är indelade i två underavsnitt som förklarar mätning av hydraulisk konduktivitet respektive mätningen av densitet och porositet.

3.2.1 Litteratursökning

En teorigenomgång inom gröna tak och relevanta vetenskapliga områden genom-fördes i syfte att skapa förståelse inför utformningen av laboratorieexperimenten. Baserat på uppdragsbeskrivningen samt information erhållen av handledaren, sam-manställdes en lista med nyckelord, vilka sedan matades in i olika databaser.

Det genomfördes ingen större planering inför teorigenomgången; inget definierat tillvägagångssätt, vilket skapade utrymme för en mer sonderad sökning med låga inklusionskrav. Större delen av litteratursökningen genomfördes dock på den biblio-grafiska databasen, *ScienceDirect*, samt universitetsdatabasen, *Chalmers library*. Då teorin till stor del bestod av allmän kunskap, med vetenskaplig konsensus vad gäller tillämpning av Darcys lag, genomfördes ingen screening av de källor som omfattades av sökningen.

Sökord: *hydrogeologi, permeabilitet, hydraulisk konduktivitet, porositet, dagvattenssy-stem, Darcys lag, gröna tak*

3.2.2 Mätning av hydraulisk konduktivitet

Själva experimentet är baserat på den tidigare beskrivna metoden *falling head*, och vardera experimentrunda dokumenterades med hjälp av videoinspelning och kunde därefter granskas i lägre uppspelningshastigheter för att få mer precisa tidsvärden. Nedan följer en redogörelse av den experimentmetod som följdes och upprepades för varje material.

Inledningsvis tas den undre cylindern loss och fylls med önskat omättat material upp till toppen. Detta packas sedan till den punkt då det är svårt för vattnet att komprimera med sin fallande kraft, och på så vis kunna skapa en luftficka i toppen av packningen. Materialet packas dock inte så hårt att det deformeras och föränd-ringar i dess egenskaper riskeras. Sedan fylls övre cylinder med cirka 1 liter vatten

vilket resulterade i en höjd på rörets rena höjdskala på ungefär 700-800 mm. Bägge cylindrar fästs sedan tillbaka i ställningens metallram, och då vattnet är helt stillastående tas det första mätvärdet i form av övre cylinders exakta vattennivå på höjdskatan. Efter detta öppnas kulventilen vilket omedelbart satte igång det vertikala flödet från övre cylinder, ner genom den undre, till den separata behållaren i botten. Simultant som ventilen öppnas startas tiden och när övre cylinders vattenflöde nått utsatt orange markering på röret, vilket kännetecknar 100 mm, stoppas tiden. Därefter låtit återstående vatten rinna klart tills det slutade droppa för att behålla samma mängd vatten i systemet (ställning och bunke).

När det har slutat droppa stängs ventilen, och vattnet från bottenbunken hålls tillbaka i den övre cylindern, och bunken ställs tillbaka tom igen. Mängden vatten i systemet är således densamma som förut, men nivån når inte upp till ursprungshöjd då en del av vattnet är kvar i undre cylindern och mättar materialet. Sedan upprepas experimentet fyra gånger när materialet är mättat innan materialet byts ut och experimentet börjar om från omättad utgångspunkt. Då varje typ av material testades i tre rundor. Således resulterade varje typ i femton individuella experiment (tre rundor med ett omättat och fyra mättade test i varje).

3.2.3 Mätning av densitet och porositet

Materialegenskaper för respektive testat materials önskades för att kunna knyta tidigare experiments värden till andra jämförbara parametrar. Därför togs värden för densitet och porositet fram för varje material. Notera att dessa värden är framtagna i bulk i och med att samtliga material är mer eller mindre porösa och packbara. Precisering av arbetsgången följer nedan.

Först placeras en rund behållare (med ungefär samma diameter som ställningens cylindrar) på en våg. Denna våg nollställs, och önskat material fylls upp till en viss nivå. Materialet packas på samma sätt som i *falling head*-experimentet för att få konsekventa resultat och därefter noteras fylld volym samt materialets massa. Bredvid fylls simultant en kanna med vatten vars volym även den noteras. I detta skede överensstämmer inte materialets volym med behållarens fyllda volym då porerna gör att det fortfarande finns inre hålrum inuti packningen. Innan experimentet fortgår beräknas densitet som materialets massa dividerat med dess omättade volym och anges i (kg/m^3).

Fortsättningsvis placeras ett filter med samma cirkulära storlek som behållaren på toppen av materialet och hålls manuellt kvar på den nivån i behållaren. Behållaren fylls med vatten från kannan genom filtret och materialets porer börjar då fyllas med vatten istället för luft. Sakta stiger den allmänna vattennivån i behållaren tills dess att nivån når filtret. Vid detta laget är den sanna (mättade) volymen uppnådd och den totala porositeten i packningen är 0%. Här noteras hur mycket volym vatten som använts från vattenkannan och därmed nu är i behållaren och materialet. Detta motsvarar materialets totala porvolym.

Slutligen beräknas porositet som porvolym dividerat med total volym, där total volym är porvolym adderat med omättad volym, och resultatet anges i [%] där 0% motsvarar solid och 100% motsvarar fullständig hållighet.

Samtliga tester genomfördes tre gånger för att undvika oregelbundna resultat.

3.2.4 Konkretisering av resultat

Med erhållna värden för varje testat materials hydrauliska konduktivitet, densitet samt porositet sammanställdes och analyserades resultaten. Detta gjordes inledningsvis i övergripande tabeller i Microsoft Excel för varje material där varje tests ingående och utgående data presenteras. Snittvärden beräknades för samtliga upprepade tester. Med hjälp av dessa snittvärden plottades sedan vardera materials hydrauliska konduktivitet mot dess densitet och porositet som punkter i varsin figur i MATLAB. Detta för att enklare kunna peka på likheter och skillnader sinsemellan.

4 Resultat

I följande kapitel presenteras och redogörs för testresultaten efter mätningarna av hydraulisk konduktivitet, densitet och porositet. Resultatet från olika material presenteras nedan och har inledningsvis delats upp i två huvudgrupper; oorganiska och organiska material. Därefter i individuella materialgrupper. Även blandningar av material redovisas under en egen rubrik. Samtliga värden från mätningar av hydraulisk konduktivitet sammanställs i tabeller under bilagorna C till E för att presentera arbetet i full utsträckning. Dessutom presenteras alla värden för tester av densitet och porositet under bilaga F. I detta avsnitt inkluderas det kontinuerligt tabeller med snittvärden för både omättade och mättade tester på varje material, tillsammans med för snittvärden av densitet och porositet.

4.1 Oorganiskt material

Under laborationen testas det som tidigare nämnt tre olika oorganiska materials avrinningsförmåga. Dessa är PE (Polyeten), EPS (Expanderad polystyren) och HB (Hollow balls), se resultaten i bilaga C. EPS 1 visar sig vara det oorganiska material med lägsta K -värdet i snitt. De andra materialen varierar mellan ungefär 2 till 5 sekunder i tid, vilket innebär att deras K -värden relativt till EPS 1 är ungefär 3.5 till 9 gånger större se bilaga C3. Samtidigt är det EPS (4-6) som utgör den undre gränsen av intervallet, och därmed är EPS det oorganiska material som ger lägst K -värde. HB resulterar i högst K -värde, vilket visas i bilaga C4.

4.1.1 Polyetenplast (PE)

I genomsnitt är K -värdet för omättad PE (4-5) 10% större än när det är mättad. Däremot så är fallet med större PE, alltså (6-7), att mättade K -värdet är 2% större än det omättade.

Det har noterats att tidtagning på omgång 1 av båda materialens tester gjordes med ett program som inte visar hundradelar. Alltså kommer tidtagaren visa exempelvis 0.30 då det egentligen kan vara 0.39, och från tiondel till tiondel kan K -värdet ändras tillräckligt för att påverka resultaten. Programmet visade heller inte "frame för frame" och därav är start- och slutpunkterna för tidtagningen något sämre. Dessa faktorer resulterar i en aning mindre pålitliga siffror relativt till omgång 2 och 3 av testerna.

Tabell 4.1: Snittvärden för PE (4-5)

PE (4-5) snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	674	629	mm
h1	100	100	mm
t	3.5	3.7	s
K	0.0635	0.0579	m/s

Tabell 4.2: Snittvärden för PE (6-7)

PE (6-7) snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	688	628	mm
h1	100	100	mm
t	3.03	2.84	s
K	0.0741	0.0756	m/s

4.1.2 Expanderad polystyren (EPS)

I genomsnitt är K -värdet för omättad EPS 1 ca 41% större än det för mättad. Däremot är den skillnaden endast 6% för EPS (4-6), och samtliga utförda tester med denna storlek av materialet visar jämnare resultat och marginella skillnader i sekunder. EPS 1 är mindre i storlek och går därmed att packa tätare i undre cylindern relativt till EPS (4-6).

Tabell 4.3: Snittvärden för EPS 1

EPS 1 snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	682	637	mm
h1	100	100	mm
t	13.87	19.39	s
K	0.0161	0.0114	m/s

Tabell 4.4: Snittvärden för EPS (4-6)

EPS (4-6) snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	678	633	mm
h1	100	100	mm
t	5.06	5.22	s
K	0.0439	0.0411	m/s

4.1.3 Hollow balls (HB)

Försöken resulterar i jämna siffror med reservation för två mindre avvikelser och snittvärdet av K för omättade tester är fortfarande något större.

Tabell 4.5: Snittvärden för HB

HB snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	680	633	mm
h1	100	100	mm
t	2.21	2.37	s
K	0.1008	0.0915	m/s

4.2 Organiskt material

Tre olika typer av organiskt material testas, lecakulor, blomjord och orkidéjord, resultatet från testerna presenteras i bilaga D. Det är även av intresse att jämföra de organiska materialens siffror med de oorganiska då dessa kan blandas och testas.

Från testerna noteras lecakulor som det organiska material som har högst snittvärden för K : mellan 0.093 till 0.101 se bilaga D1. Värdet som är nära de för hollow ball. Blomjord har större variationen i resultat jämfört med resten av de testade materialen. Orkidéjord är likt EPS 1 tidsmässigt och resulterar i snittvärden för K mellan 0.018 till 0.009, se bilaga D3.

4.2.1 Lecakulor

Lecakulor är täckta av ett fint pulver vilket blir till lera vid blandning med vatten och som ej kan rinna genom filtret på botten av den undre cylindern. Därav sköljs dessa innan testerna genomförs för att hindra förstoppning. Detta innebär att varje test börjar med relativt mättat material. Av den anledningen görs först tester ”Sköljda blöta lecakulor” och de fyra påföljande testerna samlas under ”Mättade lecakulor”. Därefter genomförs det även omättade tester med de sköljda lecakulorna efter att de har torkat.

De torkade kulorna resulterar i högst genomsnittliga K . Flera enskilda tester kommer upp i ungefär samma värde som snittet, men endast rundorna ”Mättad 1 lecakulor” och ”Mättad 2 lecakulor” saknar stora avvikelser i enskilda tester för att få ett snitt nära omgången med torkade kulor. Överlag är det små skillnader i tid och K .

Tabell 4.6: Snittvärden för lecakulor

Lecakulor snittvärden	Sköljda	Mättad	Torkade	Enhet
h0	694	628	686	<i>mm</i>
h1	100	100	100	<i>mm</i>
t	2.47	2.20	2.21	<i>s</i>
K	0.0932	0.0969	0.1012	<i>m/s</i>

4.2.2 Blomjord

Resultaten för blomsterjord störs något av lerbildning mycket likt fallet med lecakulor i grövre skala. Ibland ser vattnet ut att vara stilla eftersom det rinner igenom nedersta filtret mycket sakta. Efter varje testrunda syns hålrum bildas på toppen av den undre cylindern då jorden trycks neråt för varje gång som vatten passerar igenom och komprimerar materialet. Filtret ser ut att täckas då detta händer, likt fallet med de osköljda lecakulorna. Blomjorden testas 4 gånger per runda till skillnad från tidigare material.

Observerade värden fortsätter att konvergera men når inte stabila värden, som inte förändras signifikant från test till test. Skillanden mellan snittvärden för *K* mellan omättade och mättade test är stor, vilket kan observeras i tabell 4.7. Själva skillnaden mellan varje individuellt test är också stor, där exempelvis tredje testerna i de mättade rundorna 1,2 och 3 varierar mer relativt till annat testat material, något som kan avläsas i bilaga D.2.

Tabell 4.7: Snittvärden för blomjord

Blomjord snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	725	633	<i>mm</i>
h1	100	100	<i>mm</i>
t	88.88	183.73	<i>s</i>
K	0.0029	0.0013	<i>m/s</i>

4.2.3 Orkidéjord

Orkidéjord, till skillnad från lecakulor och blomjord, leder inte till förstoppning av filter vid blandning med vatten, men på grund av lerbildning ökar tiden ändå generellt efter varje test. Det beror på att torven packas tätare när det blir mättat och trycks ner mot filtret då vatten rinner igenom det. Därav är skillnaden stor i

snittvärde för K när materialet har fått chansen att packas. Tidsökningen, alltså minskningen i K -värde avtar för varje test.

Tabell 4.8: Snittvärden för orkidéjord

Orkidéjord snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	668	578	mm
h1	100	100	mm
t	12.17	21.98	s
K	0.0183	0.0093	m/s

4.3 Blandningar

Blandningarna som testas är blomjord med EPS 1, orkidéjord med EPS 1 och orkidéjord med PE (4-5), resultatet från testerna presenteras i bilaga E. Blomjord med EPS 1 visade sig inte fungera ihop med den använda ställningen och därför saknas värden för denna blandning. Resultaten från resterande tester skiljer sig från när materialen testas var för sig vilket går att jämför med ovanstående tabeller. Dessutom existerar det inget linjärt samband då medelvärdet av omättade K -värden från varje materials individuella tester, inte är samma som snittvärdet för K för 50/50 blandningen av de två materialen.

4.3.1 Blomjord och EPS 1

Efter tre tester med denna blandning uppstod det ett tydligt stopp. Denna blandning tydliggör felkällor som kan uppstå då tester med finkornigt material testas i denna ställning. Det visuella resultatet är bildad lera från jorden, kombinerat med att EPS-kulor som är väldigt finkorniga lägger sig över filtret.

4.3.2 Orkidéjord och EPS 1

Som siffrorna i bilaga D.3 visar, ökar tiden och därmed minskar K -värdet för varje test som genomförs. Därav testas värden tio gånger per runda till skillnad från föregående tester som testas fem gånger. Tabellen visar att det med enstaka avvikelser minskar denna ökning i tid och K -värdet konvergerar. Därav är det stor skillnad mellan snittvärden för K för omättade och mättade tester som visas i tabell 4.8.

Tabell 4.9: Snittvärden för blandning av orkidéjord och EPS 1

Orkidé + EPS 1 snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	660	598	<i>mm</i>
h1	100	100	<i>mm</i>
t	22.30	46.54	<i>s</i>
K	0.0099	0.0048	<i>m/s</i>

4.3.3 Orkidéjord och PE (4-5)

Denna blandning visar på större variation från runda till runda relativt orkidéjord och EPS 1, vilket går att jämföra i tabellerna L.1 och K.2 under bilagorna L respektive K. Däremot är båda blandningars snittvärden för K i princip samma som vad tabellerna 4.10 och 4.9 presenterar.

Tabell 4.10: Snittvärden för blandning av orkidéjord och PE (4-5)

Orkidé + PE (4-5) snittvärden	Omättad	Mättad	Enhet
h0	695	607	<i>mm</i>
h1	100	100	<i>mm</i>
t	22.06	49.15	<i>s</i>
K	0.0106	0.0048	<i>m/s</i>

4.4 Porositet och densitet

Samtliga tester finns dokumenterade i figur F.1 under bilaga F där alla värden framtagna för beräkning av densitet och porositet inkluderas för nästan varje testmaterial. Undantaget är blandningen av blomjord och EPS 1, som även saknar framtagna K -värden.

I tabell 4.11 sammanställs snittvärden för densitet och porositet. Material som kommer i två olika storlekar visar sig vara nära i både densitet och porositet. Det gör

även hollow balls och lecakulor, vilka i ovanstående avsnitt också visade liknande avrinningsegenskaper.

Medelvärden av densiteten på orkidéjord och EPS 1 resulterar inte i densiteten beräknad från deras blandningsats. Detsamma gäller blandningen av orkidéjord och PE (4-5).

Tabell 4.11: Snittvärden för porositet och densitet

Oorganiskt material	Snittdensitet (kg/m ³)	Snittporositet (%)
PE (4-5)	85.67	46.26
PE (6-7)	106.33	46.52
HB (10)	340.17	32.20
EPS 1	11.67	22.07
EPS (4-6)	12.33	27,71
Organiskt material		
Blöt Leca	332.50	31.79
Torr Leca	260.67	32.96
Blomjord	449.67	33.77
Orkidé	263-33	33.63
Sammansättningar		
Orkidé + EPS 1	162.67	24.71
Orkidé + PE 4-5	143.33	39.69

5 Diskussion

Följande kapitel har för avsikt att diskutera och redogöra för modifikationer av ställningen, samt resultatet av genomförda tester. Inledningsvis diskuteras metodvalen i form av ställning, experiment och dess felkällor. Kapitlet avslutas med att diskutera resultat från *falling head* - experimenten.

5.1 Metoddiskussion

5.1.1 Ställningens felkällor

Som det tidigare har nämnts var den initiala ställningen undermålig. En ny ställning togs därför fram med avsikt att minimera flera av de befintliga felkällorna, vilket då skulle bidra till mer valida och konsekventa resultat. Den nya ställningen var betydligt bättre än den gamla, men det kvarstod fortfarande en del felkällor.

Undre filter

En av ställningens mest avsevärda felkällor var filtret, placerad på undre cylinderns botten. Filtrets funktion var att agera underlag för testmaterialet samt fungera som ett utlopp för vattnet. Då filtret var väldigt fint uppstod ytspänning mellan hållrummen, vilket försvårade vattenavrinningen. Detta ledde till att en väsentlig mängd vatten, efter varje test, samlades i den undre cylindern. Tidsförloppet på nästkommande tester kan därmed innehålla felmarginaler, beroende på hur mycket vatten som var kvar i cylindern.

Vid de experiment där granulärt material med väldigt små korn testades försämrades avrinningen avsevärt, eftersom korn fastnade i filtrets hållrum. Ju längre varje enskilt experiment pågick desto fler hållrum fylldes med material. Felkällan gav i somliga fall upphov till inkonsekventa och felaktiga värden på tidsförloppet.

Cylinderstorlek

En annan potentiell felkälla som kan ha resulterat i missvisande värden är storleken på den undre cylindern. I teorigenomgången, se avsnitt 2.2.4, beskrivs porositetens inverkan på permeabiliteten, där hög porositet medför hög genomsläpplighet. Då den undre cylinderns tvärsnittsarea är relativt liten (i förhållande till det granulära materialets kornstorlek), leder detta till att porositeten påverkas avsevärt baserat

på materialets packningstruktur. Tomrumsvolym som uppstår när de enskilda partiklarna inte fullt ut fyller volymen av cylindern utgör därmed en stor andel av den totala volymen. Detta resulterar generellt till högre porositet, vilket således ökar genomsläppligheten och minskar det uppmätta tidsförloppet. Fenomenet uppstår främst för de större och mer kompakta granulära materialen, där möjligheten att strukturera upp dessa material är begränsad.

Ventil

Ytterligare en felkälla som uppstår på grund av ställningens utformning är kulventilen. När flödet ska initieras öppnas ventilen genom att vrida på handtaget, vilket får den genomborrade kulan att rotera i sitt sfäriska ventsäte. Felmarginal uppstår då rotation av ventilhandtaget inte sker på ett standardiserat sätt. Vattnet börjar gradvis rinna genom ventilen allt eftersom ventilen öppnas mer och mer. Tidsförloppet varierar därmed utefter hur snabbt ventilen öppnas, vilket ger stort utrymme för inkonsekventa resultat. Felmarginalen bör vara större för de material där tidsförloppet är kort exempelvis lecakulor och HB.

Ventilens öppnings- och stängningsmekanism orsakade även initial skakning av ställningen och därmed skälvning av vattnet i den övre cylindern. Ställningens varierande grad av skakning kan ha påverkat resultaten.

5.1.2 Experimentens felkällor

Det fanns ett flertal osäkerheter kring experimentens utföranden. En del beroende på svårtydda fysikaliska fenomen, andra på mänskliga faktorer.

Packningsgrad

En faktor som under experimentens gång gav upphov till inkonsekventa resultat var materialets packningsgrad. Om materialet som fyller den undre cylindern packas med varierande kraft varierar även porositeten och därmed även vattenavrinningens tidsförlopp. Packningsgrad och packningsstruktur skiljer sig ytterst lite från varandra i kompakta material, men avviker från varandra i dynamiska och mer formbara material. Detta eftersom strukturen på dynamiskt material har möjlighet att förändras när materialet deformeras.

Mätning av porositet

Porositetsexperimentets utformning skapade utrymme för felmarginaler. Ögonmått användes för att utläsa resultaten, vilket ger upphov till felaktigheter i mätdata. Även det filter som hölls på plats i syfte att förhindra materialet från att flyta till toppen kan ha haft negativ påverkan på testets validitet. Detta eftersom det fanns en risk att filtret pressade ner materialet, packade det och därmed minskade volymen.

Tidtagning

Trots att tidtagningen sköttes med hjälp av videogranskning kvarstår fortfarande den mänskliga faktorn. Optimal tidtagning är från när vatten börjar flöda till att det strömmar förbi den visuella indikationen, men detta kräver att indikationen filmas rakt på med rät vinkel. Videoinspelningen av experimenten gjordes för hand utan stativ. Detta innebär att i varje videoklipp filmas ställningen från en ny vinkel, och perspektivet för den visuella indikationen ändras. Därmed kan tidtagningen under granskning av video vara förskjutet relativt till verkligheten. Ifall denna förskjutning var konsekvent för samtliga tester hade vikten av felfaktorn varit mindre, men så är inte fallet då vinkeln som sagt är varierande. Utöver denna faktor existerar det variation i när tidtagningen startas. Med tanke på hur ventilen fungerar, tidigare beskrivet under avsnitt 5.1.1, är det svårt att få samma startpunkt för alla tester under videogranskningen. Båda dessa mänskliga faktorer bör inte påverka med mer än några hundradelar och är nödvändigtvis inte felkällor som underminerar resultaten av testerna. Procentuellt har detta som tidigare nämnt större effekt på material med kortare tidsförlopp.

Granulär konvektion

Granulära material som sätts i rörelse kan visa beteenden som går att jämföra med det av en fluid. Detta gör att större partiklar i blandningen rör sig mot toppen, eller ytan, och skapar en obalanserad blandning som kvarstår när det återgår till statistiskt tillstånd. Fenomenet kallas även för *Brazilian nut effect* (Rosato m. fl., 1987).

Denna företeelse kan försvåra arbetet med material av varierande kornstorlek eller då olika material blandas. Försök till att uppnå bra balans mellan två eller flera material kan därför resultera i motsatsen; att det större av de två lägger sig över det andra, och det kan på så vis resultera i en felkälla då blandningen ej längre representerar vad den antas göra. Fenomenet observerades i de experiment som bestod av två sammansättningar, orkidéjord med EPS 1 samt orkidéjord med PE (4-5). Då orkidéjorden i blandningarna samlades på toppen ökade andelen kvarstående PE (4-5)

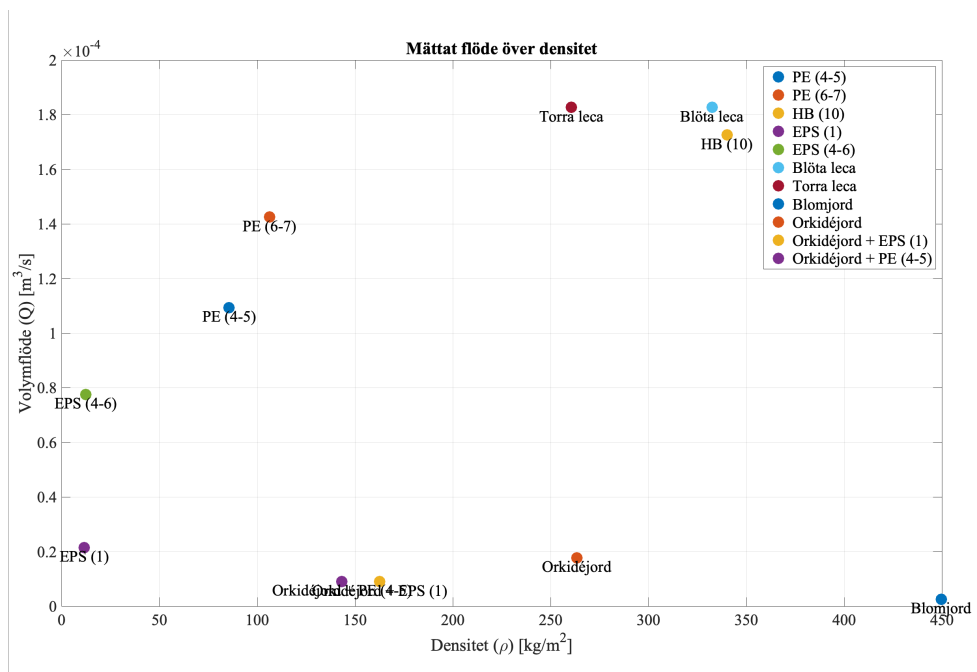
respektive EPS 1 i blandaren successivt efter varje test. Detta uppmärksammades genom att väga volymen av sammansättningen innan det testades, vilket visade på en minskning i vikt efter varje test.

5.1.3 Val av experiment

Valet av *falling head*-experimentet grundar sig i att det är en väletablerad metod utan för många ingående parametrar. Det finns dock fler faktorer att kolla på när det kommer till att studera optimala material anpassade för exempelvis gröna tak. För hög avdröjningsförmåga kan resultera i ytavrinning, då överskott av vätskan rinner av ytan på grund av att sammansättningen är mättad. En annan parameter som är värd att studera är *infiltrationen* i materialet, det vill säga hur mycket vatten ett material kan absorbera innan materialet är fullständigt mättad. Genom att studera infiltrationen i samband med den hydrauliska konduktiviten kan man hitta ett material som uppfyller krav på avdröjningsförmåga, samtidigt som materialet inte riskerar Hortonsk avrinning.

5.2 Resultatdiskussion

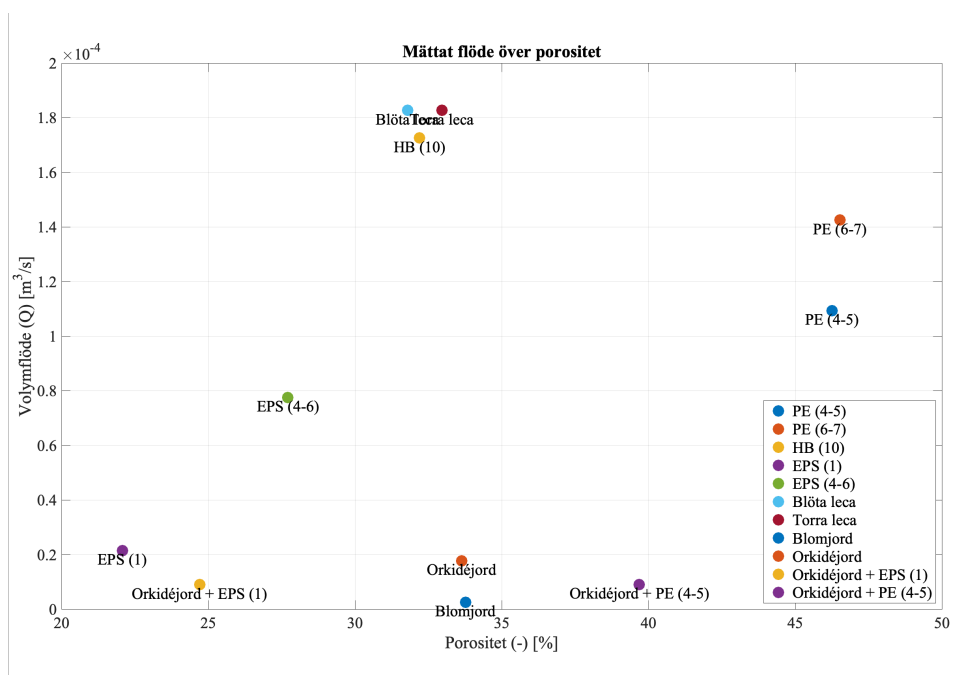
Med hjälp av diagrammen nedan görs det möjligt att särskilja på de olika materialens egenskaper visuellt. Här används nu volymflöde Q (mm^3/s) istället för hydraulisk konduktivitet K (m/s). I och med att den undre cylinderns tvärsnittsarea är konstant, och att flödet är helt vertikalt (saknar höjdgradient), kan ekvation (2.3) appliceras för att kunna ta del av datan på ett mer intuitivt sätt. Diagrammen nedan visualiserar hur volymflödet påverkas med avseende på densitet och porositet. Dessa använder sig av data tagna från de mättade testerna, då det där finns mer siffror att använda. För samma typ av diagram fast med omättade flöden, se bilaga G. I figur 5.1 ges en överblick av hur densitet påverkar respektive materials volymflöde.



Figur 5.1: Diagram med mättade materials volymflöden över respektive densitet

Blomjord har högst densitet av samtliga testade material, medan EPS 1 har minst. Trots detta lyckas EPS 1 prestera ett jämförbart resultat när det kommer till hydraulisk konduktivitet. Det finns inget linjärt samband som pekar på en korrelation mellan volymflöde och densitet. Vad som dock går att peka på är exempelvis vad som händer när orkidējord blandas ut med andra material. Där tycks det finnas ett samband mellan en minskning i densitet och ett långsammare volymflöde. I och med att materialen ska installeras på tak eller andra bärande konstruktioner spelar vikt en stor roll. Blomjord utmärker sig som det material som släpper igenom minst volym vatten per tidsenhet, men har som sagt även störst densitet och väger således också mest. Detta väcker frågor om det verkligen är värt för en konstruktör att använda sig av detta material ur ett optimeringsperspektiv.

I figur 5.2 ges en överblick av hur porositet påverkar respektive material.



Figur 5.2: Diagram med mättade materials volymflöden över respektive densitet

I fallet med porositet är det lite tydligare att det verkar finnas ett samband mellan mindre porositet och mindre volymflöde. De flesta välpresterande material, så som EPS och jordsatserna, innehåller en lägre relativ grad av porositet. Orkidéjord blandat med PE (4-5) sticker ut lite, vilket är förståeligt med tanke på den höga porositeten som infinner sig i PE-materialen.

Kornstorlek verkar vara den parameter som spelar störst roll när det kommer till hydraulisk konduktivitet och resulterande volymflöde. De material som testats i två olika storlekar (PE och EPS) visar på att den sats med minst kornstorlek åstadkommer minst volymflöde. Notera även att samtliga välpresterande testmaterial är av mindre kornstorlek, medan de större visar på motsatsen. Se exempelvis lecakulor och hollow balls, som är av jämförbar storlek och form, samt beter sig väldigt likt i båda diagrammen. Dessa är störst sett till storlek, och låter även mest vatten rinna igenom per tidsenhet.

Blomjord är ytterligare ett material som sticker ut i testerna. På grund av ställningens (och i synnerhet filtrets) begränsningar gick det inte att testa blomjord i full utsträckning. Likt orkidéjord visade blomjord på en konvergerande trend mot stabilare värden, alltså mindre förändringar mellan test till test. Med ett större antal tester kan ett tillräckligt stabilt värde teoretiskt sett uppnås. Varför sägs detta vara teoretiskt? Det finns två argument gällande varför testerna på blomjord inte ger ett

verklighetsnära resultat. Det första är knutet till vad som tas upp i avsnitt 5.1.1 som syftar till felkällor knutna till ställningens nedre filter. Det andra handlar om packningsgrad kopplat till avsnitt 5.1.2 och ifrågasätter gruppens tillvägagångssätt. Ifall blomjordens volymflöde visar sig öka för varje test på grund av att det successivt packas bör kanske testerna påbörjas först efter att materialet har förpackats i den undre cylindern och därmed fyller utrymmet likt oorganiska material. Detta för att minska skillnader i förutsättningar för varje testat material.

Problem med tester innehållande blomjord nådde sin kulmen då jorden blandades med EPS 1, vilket resulterade i ett flöde som i princip stannade av helt. Trots att inga godtyckliga data kunde erhållas från dessa test, kan det ge en indikation om blandningens effektivitet. Rätt blandning av materialen skulle därför kunna resultera i ett mycket långsamt flöde som inte avtar, utan lyckas hålla en kontinuerlig avrinning. Rätt blandning kan innebära att även använda materialen i lager. Under testerna med blomjord uppmärksammades en tendens att leda till lerbildning då vatten flödar genom materialet. Leran lägger sig över nedersta filtret och stoppar flödet. Ett sätt att undersöka blandningen av EPS 1 och blomjord kan då vara att förutom justering av komposition även placera ett undre lager av oorganiskt material i avgränsande syfte i hopp om att separera leran som annars bildas på nedersta filtret. Två saker ska uppmärksammas här. Detta kan vara ett problem specifikt knutet till den använda ställningen och dess filter. Dessutom kan det fortfarande sippra ner lera genom lagret som ska verka likt ett separerande skikt mellan lera och filter.

Det är även värt att notera vad blandningar gör för generell skillnad. Orkidéjord, som presterar bra på egen hand, bromsar ännu mer vatten när det blandas med ett mindre material sett till kornstorleken. Resultaten överträffar till och med vad blandmaterialen, EPS 1 och PE (4-5) presterar på egen hand. Alltså ges ett bättre resultat, trots att medelvärdet av blandningens samtliga kornstorlekar, bör infinna sig någonstans mitt emellan (beroende på hur väl mängderna har blandats 50-50). Det kan bero på att EPS 1 som visar sig vara effektiv på att fylla ut hålrum, gör just det vid blandning och tvingar vattnet flöda runt dess ytterskikt. En liknande verkan förväntas även av PE (4-5), men inte lika effektivt då de är större och inte kan fylla hålrummen lika bra. Det är intressant att se hur ett material i stoleken av EPS 1 och formen av PE (4-5) presterar för att bättre avgöra vikten av storlek och form.

Observationer av både mättade och omättade tillstånd, se bilaga G, föreslår att den hydrauliska konduktiviten är lägre när materialen är mättade än vad de är när de är omättade. Detta kan beror på att vatten under varje test flödar neråt och packar materialet ytterligare, vilket leder till minskad porositet i materialet. Alltså ändras omständigheter från test till test och saktar upp vattnets flöde genom materialet. Från vad som observeras i tabellerna under bilagor C till E, finns det rundor där K -värdet minskar för varje test. Då omättade tester alltid är det första testet i en runda, med avvikelse för lecakulor, bör det reflekteras kring ifall anledningen till att omättade tester visar högre K -värde verkligen stämmer.

6 Slutsats

Med erhållna experimentdata och given interdisciplinär teori kan man konstatera att granulära material med olika egenskaper ger olika utfall när det kommer till att fördröja avrinningsförloppet.

Som påpekat i tidigare kapitel har kornstorlek störst inverkan av de egenskaper som noterades (följt av porositet och sist densitet). Generellt sett syns en koppling mellan liten kornstorlek och långsamma volymflöden. Se exempelvis resultaten från testerna av EPS 1 och PE (4-5) och jämför de mindre kontra de större likformiga EPS (4-6) och PE (6-7). Däremot bör inte målet vara att minimera kornstorleken så mycket som möjligt. Mindre kornstorlek riskerar att bromsa flödet till en så låg grad att avrinning temporärt eller fullständigt avtar, vilket skulle kunna leda till ansamling av stor mängd massa som måste hållas av en bärande konstruktion. Dessutom ökar risken för översvämningar om inflödet blir för stort i förhållande till utflödet.

Kombinationer av olika material visar sig vara effektivt vid fördröjning av avrinning. Genom att blanda två välpresterande material, exempelvis orkidéjord och EPS 1, kan man uppnå ett resultat som överträffar de båda. Minskad porositet uppkommer när materialen kombineras och hålrummen i cylindern fylls. Dock testades relativt få materialblandningar och det skulle därmed krävas fler tester med större utbud av material för att säkerställa påståendet.

Det finns fler aspekter och faktorer att undersöka vidare. En sådan aspekt kan vara att vidare undersöka hur materialens infiltrationsgrad påverkar avrinningsförmågan på lång sikt. Denna studie tar ej heller hänsyn till yttre faktorer och verkliga förhållanden som regnmiljö och utomhusklimat, som kan vara relevanta för att spegla praktisk implementering av gröna tak.

Det är uppenbart att de erhållna resultaten är ett första steg i en process som kräver fortsatt arbete som antagligen lär sträcka sig över en längre period. Dessa slutsatser bör därför rimligtvis ses som en god grund för ytterligare fördjupningar snarare än som en färdigbehandlad konkretisering av ämnet. Kommande steg kan vara vidare uppgraderingar av experimentställningen med mål att minimera identifierade felkällor, samt att testa fler material, fler blandningar och mäta fler parametrar för att bygga ytterligare förståelse kring ämnet.

Referenser

- Alabi, O. (jan. 2011). "Validity of Darcy's Law in Laminar Regime". I: *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16.
- Alabi, O., T. Ojorongbe och S. Sedara (maj 2019). "Gradients of Seepage velocity model for contaminant transport prediction". I: *Scientific African* 4, e00087. DOI: [10.1016/j.sciaf.2019.e00087](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00087).
- Alderton, D. och S. A. Elias (2021). *Encyclopedia of Geology / ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780081029091/encyclopedia-of-geology>.
- Atangana, A. (jan. 2018). "Chapter 2 - Principle of Groundwater Flow". I: utg. av A. Atangana. Academic Press, s. 15–47. ISBN: 9780128096703. DOI: [10.1016/B978-0-12-809670-3.00002-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809670-3.00002-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128096703000023>.
- Bense, V., T. Gleeson, S. Loveless, O. Bour och J. Scibek (dec. 2013). I: *Earth-Science Reviews* 127, s. 171–192. DOI: [10.1016/j.earscirev.2013.09.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825213001657>.
- Boverket (n.d.). *Grönytefaktor – räkna med ekosystemtjänster*. URL: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/Allmant-om-PBL/teman/ekosystemtjanster/verktyg/gronytefaktor/>.
- Christian, J. T. (jan. 2003). "Soil Mechanics". I: *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Utg. av R. A. Meyers. Academic Press, s. 63–76. ISBN: 9780122274107. DOI: [10.1016/B0-12-227410-5/00880-2](https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00880-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105008802>.
- Department of Jobs, P. och Regions (n.d.). *Understanding porosity and permeability*. URL: <https://earthresources.vic.gov.au/projects/victorian-gas-program/onshore-conventional-gas/porosity-permeability>.
- Freeze, R. A. och J. A. Cherry (1979). *Groundwater*. Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall, Inc.

- GeotechData (2021). *Falling head permeability test setup*. URL: http://civcal.media.hku.hk/airport/investigation/laboratory/permeability/_hidden/fallinghead.jpg?fbclid=IwAR0RPee_SF_U0-Y-8eCu778BYz3Qon4V-Z56YE5bpH.
- Håkansson, M. (2000). *Skogsencyklopedin : 8400 artiklar och ordförklaringar*. Sveriges skogsvärdsförb. ISBN: 917646041X.
- Kozłowski, T. och A. Ludynia (2019). "Permeability Coefficient of Low Permeable Soils as a Single-Variable Function of Soil Parameter". I: *Water* 11.12. ISSN: 2073-4441. DOI: [10.3390/w11122500](https://doi.org/10.3390/w11122500). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/12/2500>.
- Liu, P. och G. Chen (jan. 2014). *Chapter Nine - Characterization Methods: Basic Factors*, s. 411–492. ISBN: 978-0-12-407788-1. DOI: [10.1016/B978-0-12-407788-1.00009-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407788-1.00009-5). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077881000095>.
- Naturvårdsverket (febr. 2020). *Planera för en hållbar dagvattenhantering*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Fysisk-planering-hallbar-utveckling/Hallbar-dagvattenhantering/>.
- Pettersson, K., P. Johansson och A. Sasic Kalagasidis (maj 2018). "En introduktion till dagvattenflödesmodellering i gröna tak". I:
- Ramkumar, M., R. A. James, D. Menier och K. Kumaraswamy (2018). *Coastal Zone Management: Global Perspectives, Regional Processes, Local Issues*. Utg. av M. Ramkumar, A. James, D. Menier och K. Kumaraswamy. Elsevier Science Publishing. ISBN: 9780128143506.
- RISE (febr. 2021). "Vi måste se dagvatten som en resurs". URL: <https://www.ri.se/sv/berattelser/vi-maste-se-dagvatten-som-en-resurs>.
- (n.d.). *Urban dagvattenhantering*. URL: <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/expertiser/dagvatten>.
- Rosato, A., K. J. Strandburg, F. Prinz och R. H. Swendsen (mars 1987). "Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking". I:

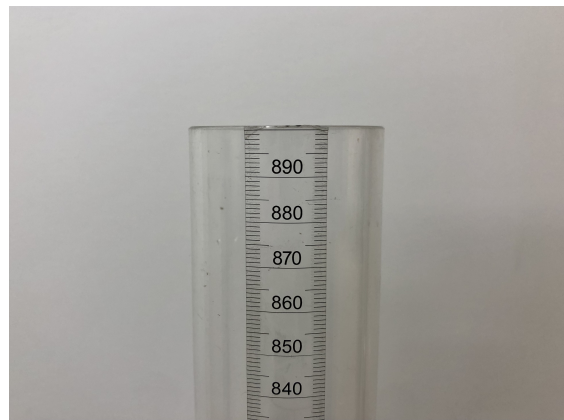
- Phys. Rev. Lett.* 58 (10), s. 1038–1040. DOI: [10.1103/PhysRevLett.58.1038](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1038).
URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.1038>.
- SLU (sept. 2019). *Gröna lösningar gav skydd mot översvämning*. URL: <https://www.slu.se/ew-nyheter/2019/9/grona-losningar-gav-skydd-mot-oversvamning/>.
- SMHI (april 2021). *Skyfall och översvämningar idag och i framtiden*/ SMHI. URL: <https://www.smhi.se/forskning/forskning-for-ett-hallbart-samhalle/skyfall-oversvamningar-1.163637>.
- Smith, L. (jan. 2015). "Hydrogeology". I: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. ISBN: 9780124095489. DOI: [10.1016/B978-0-12-409548-9.09469-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09469-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489094690>.
- Theis, C. V. (1935). "The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage". I: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 16.2, s. 519–524. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR016i002p00519>.
- Wang, L., Y. Li, G. Zhao, N. Chen och Y. Xu (nov. 2019). "Experimental Investigation of Flow Characteristics in Porous Media at Low Reynolds Numbers ($Re \rightarrow 0$) under Different Constant Hydraulic Heads". I: *Water* 11.11, s. 2317. DOI: [10.3390/w11112317](https://doi.org/10.3390/w11112317). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/11/2317>.
- White, F. M. (2015). *Fluid Mechanics*. 8. utg. McGraw-Hill Professional. ISBN: 9780073398273.
- Wikipedia (2021). *Hydrologi*. URL: <https://sv.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydrologi&oldid=48730934>.
- Wool, R. P. (jan. 2005). "13 - HURRICANE-RESISTANT HOUSES FROM SOY-BEAN OIL AND NATURAL FIBERS". I: *Bio-Based Polymers and Composites*. Utg. av R. P. Wool och X. S. Sun. Academic Press, s. 448–482. ISBN:

9780127639529. DOI: 10.1016/B978-012763952-9/50014-9. URL: [https :
//www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127639529500149](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127639529500149).

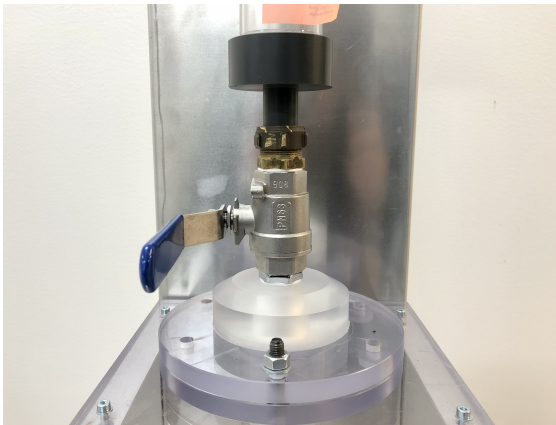
A Detaljbilder på slutgiltig experimentställning



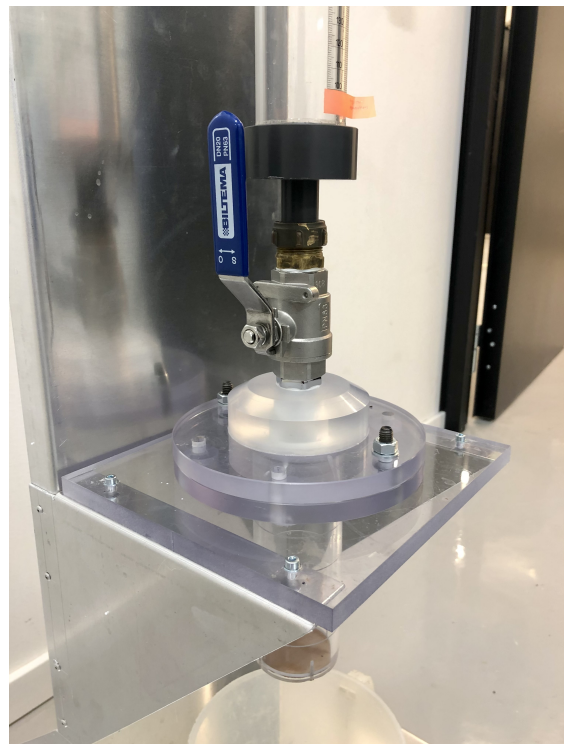
Botten av övre cylinder



Toppen av övre cylinder



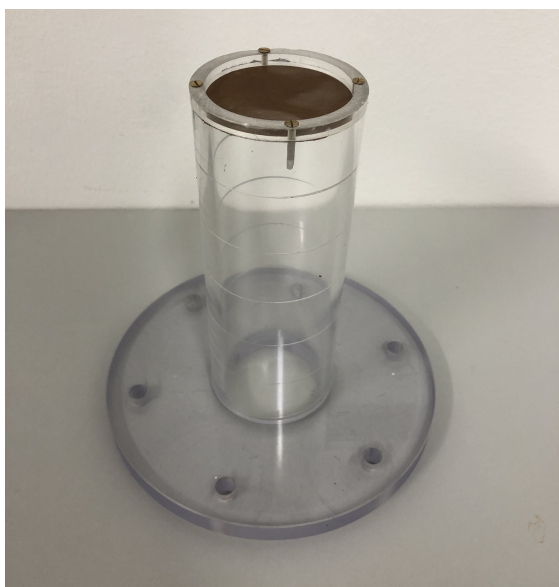
Utsida av stängd kulventil



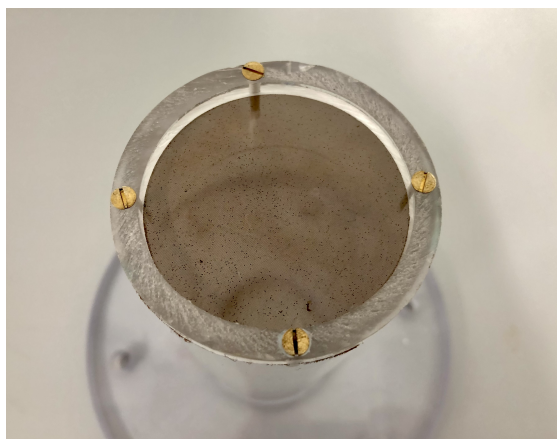
Utsida av öppen kulventil



Isärplockat skruvförband



Undre cylinder ovanifrån



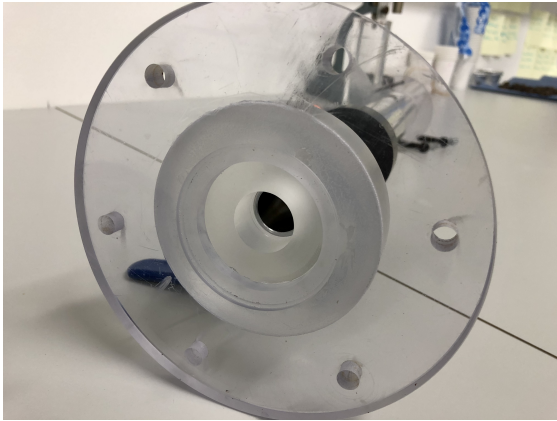
Undre cylinders filter



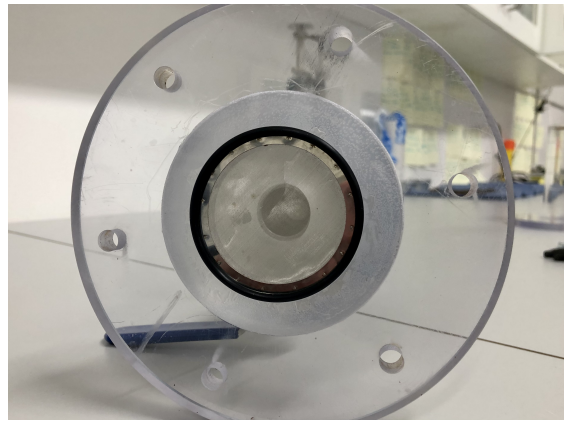
Invärtes diffusor



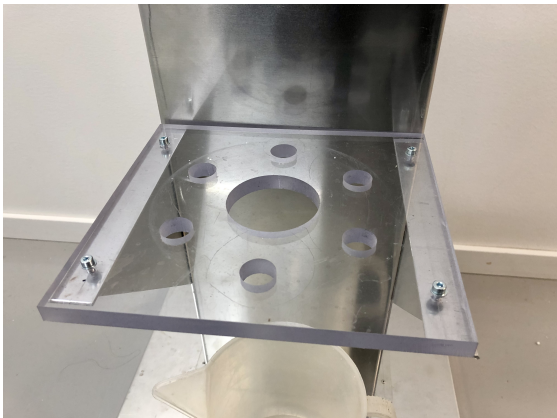
Invärtes O-ring



Invärtes plats för diffusor och O-ring



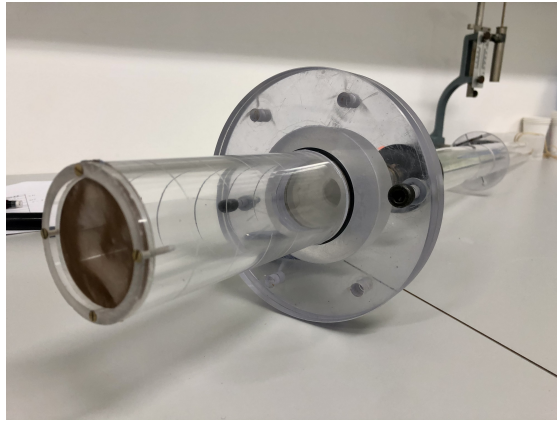
Installation av diffusor och O-ring



Metallramens dockstation

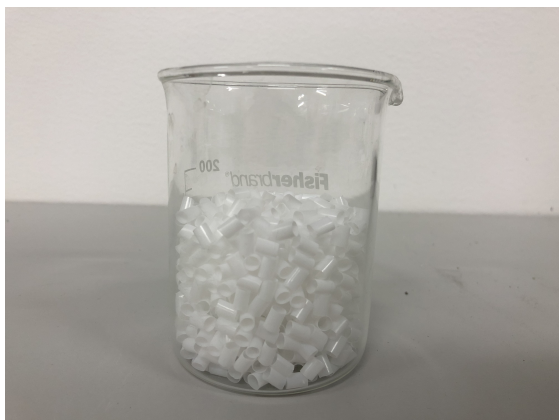


Metallram i helhet

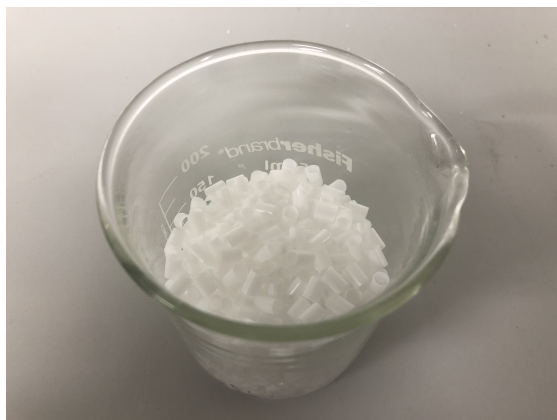


Montering av cylindrar

B Bilder på testmaterial



PE (4-5)



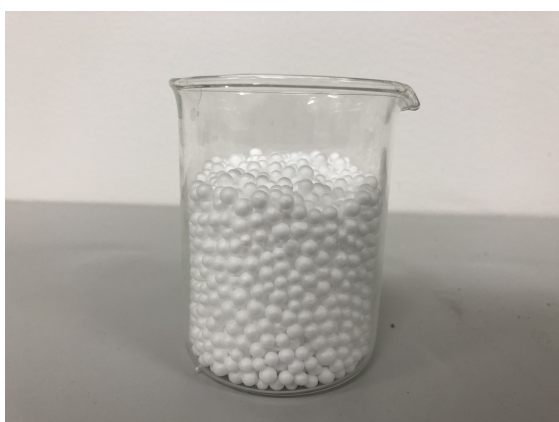
PE (4-5)



PE (6-7)



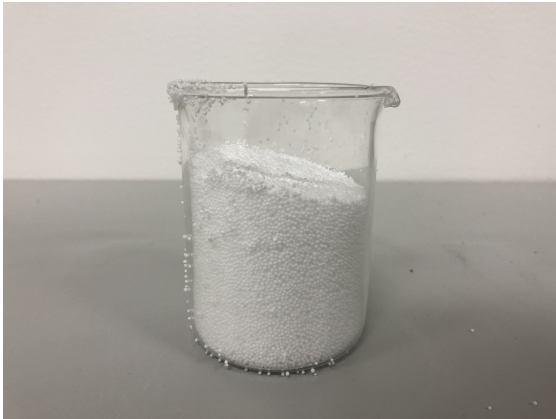
PE (6-7)



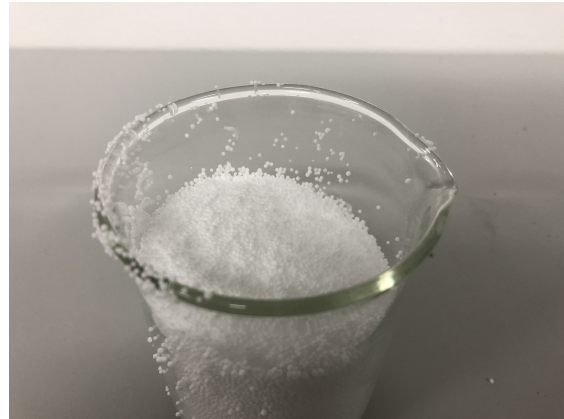
EPS (4-6)



EPS (4-6)



EPS 1



EPS 1



Hollow balls



Hollow balls



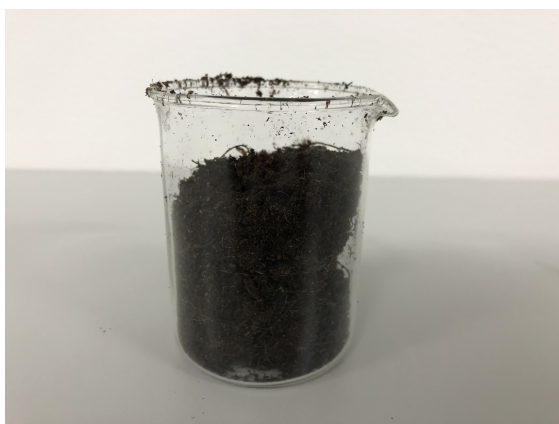
Sköljda torkade lecakulor



Sköljda torkade lecakulor



Storleksexempel leca-kulor



Blomjord



Blomjord

C Samtliga oorganiska resultat

Tabell C.1: Alla värden för PE (4-5)

Omättad PE (4-5)	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	655	680	686	-		mm
h1	100	100	100	-		mm
t	3.8	3.29	3.41	-		s
K	0.0574	0.0677	0.0656	-	0.0636	m/s
Mättad 1 PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	644	641	641	640		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	4.5	4	3.8	3.8		s
K	0.0481	0.0539	0.0568	0.0567	0.0539	m/s
Mättad 2 PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	649	564	539	654		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	3.48	3.48	3.29	3.36		s
K	0.0624	0.0577	0.0595	0.0649	0.0611	m/s
Mättad 3 PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	648	646	642	640		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	4.06	3.55	3.57	3.53		s
K	0.0534	0.0610	0.0605	0.0611	0.0589	m/s

Tabell C.2: Alla värden för PE (6-7)

Omättad PE (6-7)	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	684	701	680	-		<i>mm</i>
h1	100	100	100	-		<i>mm</i>
t	2.8	3.1	3.2	-		<i>s</i>
K	0.0797	0.0729	0.0695	-	0.0741	<i>m/s</i>
Mättad 1 PE (6-7)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	671	670	670	640		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	3.3	3.1	3.1	2.9		<i>s</i>
K	0.0669	0.0712	0.0712	0.0743	0.0709	<i>m/s</i>
Mättad 2 PE (6-7)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	582	615	610	625		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	2.54	2.59	2.53	3.18		<i>s</i>
K	0.0805	0.0814	0.0829	0.0669	0.0779	<i>m/s</i>
Mättad 3 PE (6-7)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	672	587	591	604		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	3.21	2.57	2.55	2.56		<i>s</i>
K	0.0689	0.0799	0.0809	0.0816	0.0778	<i>m/s</i>

Tabell C.3: Alla värden för EPS 1

Omättad EPS 1	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	698	670	678	-		<i>mm</i>
h1	100	100	100	-		<i>mm</i>
t	14.21	13.27	14.13	-		<i>s</i>
K	0.0159	0.0166	0.0157	-	0.0161	<i>m/s</i>
Mättad 1 EPS 1	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	650	650	652	653		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	19.13	22.24	24.04	25.07		<i>s</i>
K	0.0114	0.0098	0.0091	0.0087	0.0097	<i>m/s</i>
Mättad 2 EPS 1	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	624	625	630	630		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	15.25	15.2	15.17	16		<i>s</i>
K	0.0139	0.0139	0.0141	0.0134	0.0138	<i>m/s</i>
Mättad 3 EPS 1	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	622	633	636	637		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	19.21	20.1	21.1	20.24		<i>s</i>
K	0.0110	0.0107	0.0102	0.0106	0.0106	<i>m/s</i>

Tabell C.4: Alla värden för EPS (4-6)

Omättad EPS (4-6)	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	673	670	690	-		<i>mm</i>
h1	100	100	100	-		<i>mm</i>
t	5.08	5.08	5.03	-		<i>s</i>
K	0.0436	0.0435	0.0446	-	0.0439	<i>m/s</i>
Mättad 1 EPS (4-6)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	649	641	637	635		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	5.12	5.15	5.19	5.11		<i>s</i>
K	0.0424	0.0419	0.0414	0.0420	0.0419	<i>m/s</i>
Mättad 2 EPS (4-6)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	609	636	630	632		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	5.1	5.19	5.12	5.14		<i>s</i>
K	0.0411	0.0414	0.0417	0.0416	0.0415	<i>m/s</i>
Mättad 3 EPS (4-6)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	670	623	615	620		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	5.1	5.1	6.06	5.27		<i>s</i>
K	0.0433	0.0416	0.0348	0.0402	0.0399	<i>m/s</i>

Tabell C.5: Alla värden för HB

Omättad HB	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	686	692	661	-		<i>mm</i>
h1	100	100	100	-		<i>mm</i>
t	2.22	2.22	2.18	-		<i>s</i>
K	0.1007	0.1012	0.1006	-	0.1008	<i>m/s</i>
Mättad 1 HB	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	661	641	650	626		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	2.25	2.19	2.24	3.07		<i>s</i>
K	0.0974	0.0985	0.0970	0.0694	0.0906	<i>m/s</i>
Mättad 2 HB	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	651	657	651	649		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	2.28	3.03	2.27	2.29		<i>s</i>
K	0.0954	0.0721	0.0958	0.0948	0.0895	<i>m/s</i>
Mättad 3 HB	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	612	611	586	606		<i>mm</i>
h1	100	100	100	100		<i>mm</i>
t	2.24	2.22	2.17	2.21		<i>s</i>
K	0.0939	0.0947	0.0946	0.0947	0.094459	<i>m/s</i>

D Samtliga organiska resultat

Tabell D.1: Alla värden för lecakulor

Sköljda blöta lecakulor	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	703	704	676	-		mm
h1	100	100	100	-		mm
t	2.24	2.16	3.01	-		s
K	0.1011	0.1049	0.0737	-	0.0932	m/s
Skjöllda torkade lecakulor	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	673	670	716	-		mm
h1	100	100	100	-		mm
t	2.14	2.22	2.27	-		s
K	0.1034	0.0995	0.1007	-	0.1012	m/s
Mättad 1 lecakulor	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	640	638	634	647		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	2.2	2.15	2.25	2.23		s
K	0.0978	0.1001	0.0953	0.0972	0.0976	m/s
Mättad 2 lecakulor	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	672	650	662	660		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	2.2	2.22	2.2	2.17		s
K	0.1005	0.0979	0.0997	0.1009	0.0998	m/s
Mättad 3 lecakulor	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	601	583	579	575		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	2.2	2.14	2.27	2.19		s
K	0.0947	0.0957	0.0898	0.0927	0.0932	m/s

Tabell D.2: Alla värden för blomjord

Omättad blomjord	1	2	3	Snitt K	Enhet
h0	681	695	800		mm
h1	100	100	100		mm
t	56.28	80.09	130.26		s
K	0.0039	0.0028	0.0018	0.0029	m/s
Mättad 1 blomjord	1	2	3	Snitt K	Enhet
h0	633	589	615		mm
h1	100	100	100		mm
t	112.24	104.29	144.14		s
K	0.0019	0.0019	0.0015	0.0018	m/s
Mättad 2 blomjord	1	2	3	Snitt K	Enhet
h0	597	623	628		mm
h1	100	100	100		mm
t	105.02	163.19	204.26		s
K	0.0019	0.0013	0.0010	0.0014	m/s
Mättad 3 blomjord	1	2	3	Snitt K	Enhet
h0	614	679	723		mm
h1	100	100	100		mm
t	223.08	261.29	336.03		s
K	0.0009	0.0008	0.0007	0.0008	m/s

Tabell D.3: Alla värden för orkidéjord

Omättad orkidéjord	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	654	650	700	-		mm
h1	100	100	100	-		mm
t	10.21	13.14	13.15	-		s
K	0.0214	0.0165	0.0172	-	0.0184	m/s
Mättad 1 orkidéjord	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	603	591	555	562		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	22.02	22.22	21.18	24.11		s
K	0.0095	0.0093	0.0094	0.0083	0.009116	m/s
Mättad 1 orkidéjord	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	528	548	566	564		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	19.24	21.29	22.22	21.07		s
K	0.0100	0.0093	0.0091	0.0095	0.00947	m/s
Mättad 1 orkidéjord	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	580	598	615	621		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	16.09	22.24	25.09	27.01		s
K	0.0127	0.0093	0.0084	0.0078	0.0096	m/s

E Samtliga resultat från blandningar

Tabell E.1: Omättade värden för blandning av orkidéjord och EPS 1

Omättad orkidé EPS	1	2	3	Snitt K	Enhet
h0	634	665	680		<i>mm</i>
h1	100	100	100		<i>mm</i>
t	18.48	22.39	26.02		<i>s</i>
K	0.0116	0.0098	0.0085	0.0099	<i>m/s</i>

Tabell E.2: Mättade värden för blandning av orkidéjord och EPS 1

Mättad 1 orkidé EPS 1	1	2	3	4	5	
h0	603	608	608	610	610	
h1	100	100	100	100	100	
t	29.15	33.04	37.2	39.57	42.28	
K	0.0072	0.0063	0.0056	0.0053	0.0049	
	6	7	8	9	Snitt K	Enhet
	613	613	613	614		mm
	100	100	100	100		mm
	45.38	47.43	48.47	48.46		s
	0.0046	0.0044	0.0043	0.0043	0.0052	m/s
Mättad 2 orkidé EPS 1	1	2	3	4	5	
h0	587	592	596	597	598	
h1	100	100	100	100	100	
t	27.49	36.08	49.55	45.15	49.11	
K	0.0075	0.0057	0.0042	0.0046	0.0042	
	6	7	8	9	Snitt K	Enhet
	600	599	599	599		mm
	100	100	100	100		mm
	53.18	56.13	56.45	57.38		s
	0.0039	0.0037	0.0036	0.0036	0.0046	m/s
Mättad 3 orkidé EPS 1	1	2	3	4	5	
h0	603	608	608	610	610	
h1	100	100	100	100	100	
t	29.15	33.04	37.2	39.57	42.28	
K	0.0071	0.0063	0.0056	0.0053	0.0049	
	6	7	8	9	Snitt K	Enhet
	613	613	613	614		mm
	100	100	100	100		mm
	45.38	47.43	48.47	48.46		s
	0.0046	0.0044	0.0043	0.0043	0.0052	m/s

Tabell E.3: Alla värden för 50-50 blandning av orkidéjord och PE (4-5)

Omättad orkidé PE (4-5)	1	2	3	-	Snitt K	Enhet
h0	753	663	670	-		mm
h1	100	100	100	-		mm
t	22.11	16.47	27.59	-		s
K	0.0106	0.0133	0.0080	-	0.0106	m/s
Mättad 1 orkidé PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	723	727	664	669		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	53.26	93.12	77.35	76.37		s
K	0.0043	0.0025	0.0028	0.0029	0.0031	m/s
Mättad 2 orkidé PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	555	573	582	582		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	28.54	30.45	33.26	37.15		s
K	0.0068	0.0067	0.0061	0.0055	0.0063	m/s
Mättad 3 orkidé PE (4-5)	1	2	3	4	Snitt K	Enhet
h0	545	550	556	554		mm
h1	100	100	100	100		mm
t	35.03	37.06	42.2	46.02		s
K	0.0056	0.0053	0.0047	0.0043	0.0050	m/s

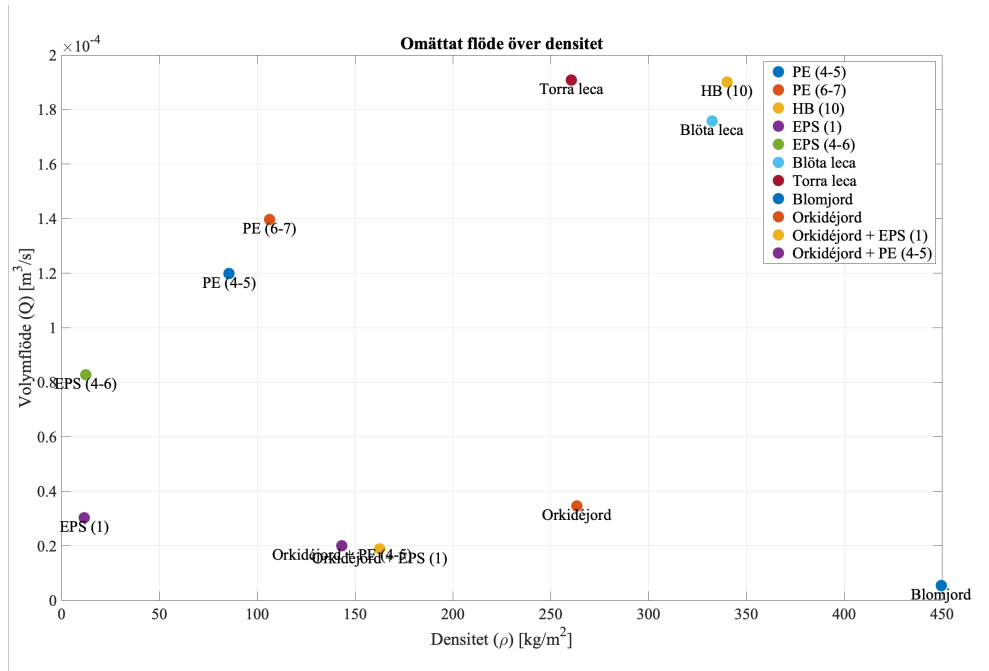
F Samtliga resultat från tester av densitet och porositet

Figur

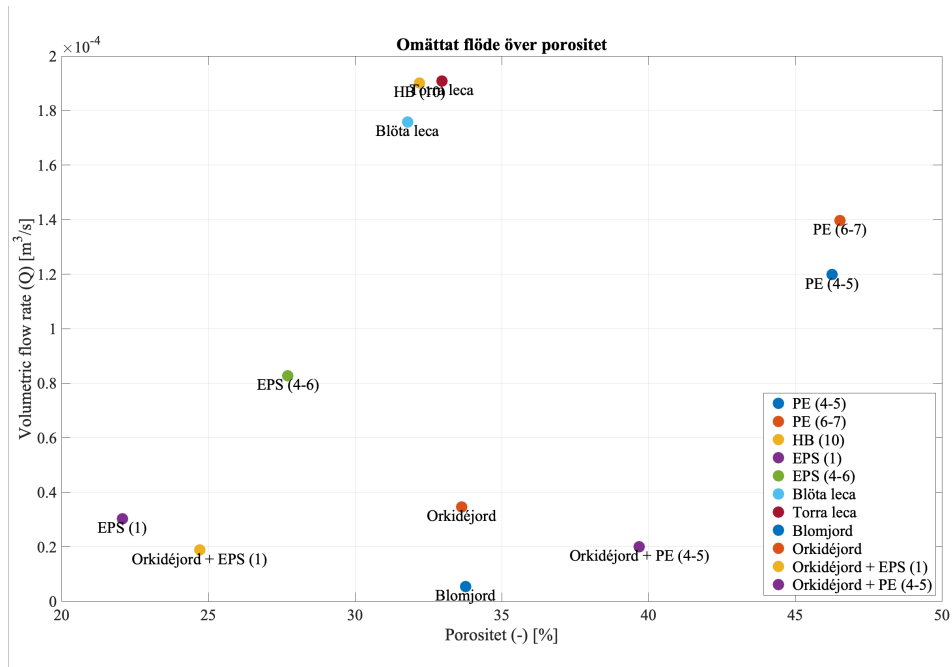
Figur F.1: Alla värden för porositet och densitet

Material	PE (4-5)	PE (6-7)	HB (10)	EPS (1)	EPS (4-6)	Blöta Leca	Torra Leca	Blomjord	Orkidé	Orkidé + EPS (1)	Orkidé + PE (4-5)
1											
Massa container (g)	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2
Massa material (g)	17	22	67	2.3	2.5	69.2	53.5	87.8	23	18	28.5
Volym material (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	100	100	200
Volym vatten innan (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Volym vatten efter (ml)	25	32.5	105	140	125	115	100	94	150	160	74
Porvolym (m ³)	175	167.5	95	60	75	85	100	106	50	40	126
Densitet	85	110	335	11.5	12.5	346	267.5	439	230	180	142.5
Porositet	0.466667	0.455782	0.322034	0.230769	0.272727	0.298246	0.333333	0.346405	0.333333	0.285714286	0.386503067
2											
Massa container (g)	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2
Massa material (g)	17.6	21.3	69.8	2.3	2.4	65.8	51.1	88.6	26.6	15.6	29
Volym material (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	100	100	200
Volym vatten innan (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Volym vatten efter (ml)	28.5	21	105	145	125	105	103	100	148	171	68
Porvolym (m ³)	171.5	179	95	55	75	95	97	100	52	29	132
Densitet	88	106.5	349	11.5	12	329	255.5	443	266	156	145
Porositet	0.461642	0.472296	0.322034	0.215686	0.272727	0.322034	0.326599	0.333333	0.342105	0.224806202	0.397590361
3											
Massa container (g)	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2
Massa material (g)	16.8	20.5	67.3	2.4	2.5	64.5	51.8	93.4	29.4	15.2	28.5
Volym material (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	100	100	200
Volym vatten innan (ml)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Volym vatten efter (ml)	30	24.5	105	145	120	100	102	100	150	170	63
Porvolym (m ³)	170	175.5	95	55	80	100	98	100	50	30	137
Densitet	84	102.5	336.5	12	12.5	322.5	259	467	294	152	142.5
Porositet	0.459459	0.467377	0.322034	0.215686	0.285714	0.333333	0.328859	0.333333	0.333333	0.230769231	0.40652819
Snittdensitet (kg/m ³)	85.67	106.33	340.17	11.67	12.33	332.50	260.67	449.67	263.33	162.67	143.33
Snittporositet (%)	46.26	46.52	32.20	22.07	27.71	31.79	32.96	33.77	33.63	24.71	39.69

G Diagram för omättade tester



Figur G.1: Diagram med omättade materials volymflöden över respektive densitet



Figur G.2: Diagram med omättade materials volymflöden över respektive porositet