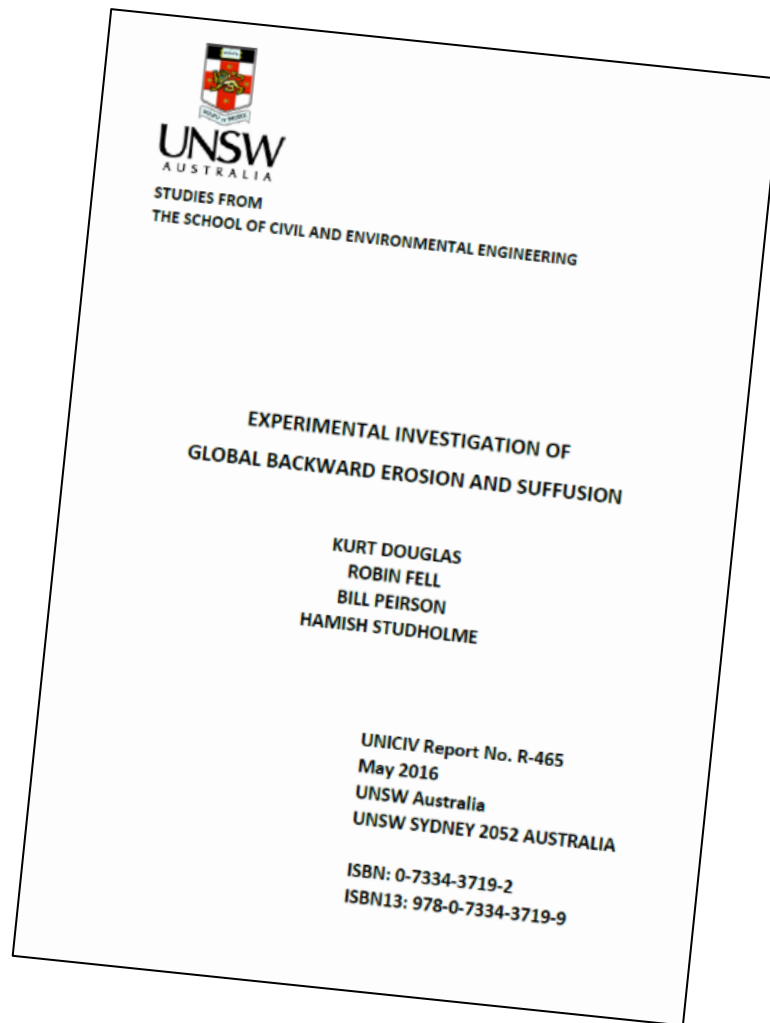




Fortsatt utbyte med UNSW: Sammanfattning av GBE- tester och analys

Datum: 2017-02-22 Slutrapport
Upprättad av: Hans Rönnqvist, Tekn. Dr.

Kund / Uppdrag:
Energiforsk AB / VK12109 /
Sara Sandberg

Konsult:
RQV Teknik AB
Org.nr.: 559032-3530

Kontakt:
Hans Rönnqvist
hans.ronnqvist@rqv.se
Mobil: 070-642 17 87

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	SAMMANFATTNING	2
2	INLEDNING	4
3	BAKGRUND.....	4
4	OMFATTNING AV UPPDRAGET.....	4
5	GBE-TESTER: GLOBAL BACKWARD EROSION	5
5.1	Allmänt.....	5
5.2	Slutrapport: GBE, R-465	7
6	R-465 JÄMFÖRT MED RÖNNQVIST (2015).....	10
6.1	Allmänt.....	10
6.1	Testmaterial, R-465.....	12
6.1	UNSW:s R-465 data och Rönnqvist (2015) data	12
7	REFERENSER	14

1 SAMMANFATTNING

RQV Teknik har av Energiforsk AB fått i uppdrag att fortsätta forskningsutbytet med UNSW, Australien. Som bakgrund gäller att Energiforsk delfinansierat UNSW forskning inom inre erosion. En avgörande del i uppdraget var att studera UNSW:s GBE-tester (Global Backward Erosion) för att se om likheter finns med svenska dammaterial och om lärdomar kan dras från detta.

Försöken som utfördes 2013–2016 vid UNSW omfattade mekanismerna suffusion och bakåtskridande erosion (GBE), samt hur självfiltrering inverkar.

Följande kan framlyftas:

- (renodlad) suffusion är ett snabbt förlopp med stor erosion, medan GBE kan ha ett långsammare framskridande och kan återaktiveras vid förhöjd gradient och leda till stor erosion. Återaktiveringen är av stor vikt vid förståelsen av långtidsperspektivet för inre erosion och det faktum att sjunkhål uppträder även i

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

gamla dammar utan tidigare historik av inre erosion. En höjning av gradienten till nivåer som tidigare ej upplevts kan alltså ha inverkan.

- självfiltrering, å andra sidan, dvs att ett material ”självläker”, kan leda till mycket höga lokala gradienter (upp till 60).
- till skillnad från inre erosion i en koncentrerad läcka där förloppet kan bli fortgående, leder suffusion och GBE till omfattande erosion av ”findelen” av materialet medan grovdelen kvarstår. Grovdelen kan då begränsa flödet genom det eroderade området, vilket är av betydelse för huruvida förloppet kan fortgå från en incident till ett dammbrott.

UNSW presenterar en ny metod för bedömning av suffusion och GBE i silt-sand-grus-jordmaterial utan plasticitet. Labförsöken visade att eroderat material i regel är finkornigare än ca 1 mm, så grovsand-delen i ett material är betydande eftersom den skapar filtrering av de finkornigare fraktionerna. Metoden identifierar material med brant grus-sten-andel och flack fin-del (språnggradering i sandfraktionen) som suffusiva och GBE-känsliga.

Materialen som UNSW har undersökt påminner delvis kornstorleksmässigt om svenska tätjordsmaterial av morän (grovkornig sort). UNSW:s material kompletterar för övrigt de material som undersöktes vid LTU 2014–2015 inom ramen för Rönqvist (2015). I föreliggande rapport har UNSW:s data inarbetats i LTU 2014–2015:s resultat. I stort bekräftar detta de slutsatser som gjorts i Rönqvist (2015) och därmed ökar förståelsen för erosions-förlopp i moränmaterial.

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

2 INLEDNING

RQV Teknik AB (RQV) erhöill ett inledande uppdrag av Energiforsk AB (Energiforsk) som omfattade ett forskningsutbyte om inre erosion med University of New South Wales (UNSW), Australien. Uppdraget påbörjades 2013 inom ramen för undertecknads doktorandstudier och slutrapporterades 2016-05-18.

Föreliggande uppdrag utgör ett fortsatt utbyte, främst med syfte att studera/analysera resultatet från UNSW:s GBE-tester (Global Backward Erosion) samt att undersöka paralleller med lab-tester utförda vid LTU 2014–2015 (Rönnqvist, 2015).

3 BAKGRUND

Energiforsks dammsäkerhetsprogram finansierar forskning vid University of New South Wales (UNSW) (under ledning av Prof. Emeritus Robin Fell). Det senaste forskningsprogrammet ("Linkage grant project – Erosion of embankment dams and dams spillways") påbörjades 2012 och löpte till slutet av 2016. Följande forskningsprojekt har utförts:

- 1. Bakåtskridande erosion i undergrunden (BEP). (Pågående).
- 2. Bakåtskridande erosion i dammkroppen (GBE, global backward erosion). (Slutfört 2016)
- 3. Erosion av utskovskanaler i samband med avbördning. (Slutfört 2016).
- 4. Sprickbildning i dammar. (Pågående).

Projekt 1 (BEP) och 4 (Sprickbildning) pågår fortfarande och slutförs inom 2017.

4 OMFATTNING AV UPPDRAGET

Uppdraget behandlar fortsatt utbyte med UNSW-forskning inom inre erosion, med beställning daterad 2016-12-12, som omfattar följande:

- Uppdaterat PM som godkänns av Energiforsks styrgrupp för dammsäkerhetstekniskt utvecklingsprogram.
- Kortfattad projektbeskrivning för publicering på Energiforsks hemsida i syfte att kommunicera om projektet.
- Lägesrapportering vid styrgruppsmöte. Vid 80% upparbetning ska Energiforsks kontaktperson underrättas.

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

- Muntlig redovisning av slutresultat Energiforsks referensgrupp / styrgrupp.

Projektbeskrivningen, daterad 2016-09-12 (RQV), förtydligar enligt följande:

- Fortsatt utbyte och uppföljning av forskningen som rör bakåtskridande erosion.
- Genomläsning och återkoppling till UNSW med kommentarer på deras arbete.
- GBE-tester och jämförelse med tester utförda vid LTU 2014–2015.

5 GBE-TESTER: GLOBAL BACKWARD EROSION

5.1 Allmänt

Testerna genomfördes i fyra permeametrar med diameter 450 mm. Speciellt fokus lades på tidsaspekten i erosionsförloppet, samt portryck, gradient och flöde. Förloppet ”Global bakåtskridande erosion” skissas i **figur 1**. Syftet var dels att undersöka grunden till bakåtskridande erosion i dammkroppen (GBE), hur den anknyter till suffusion (erosion av finmaterial i kornskelettet av grövre partiklar), och möjligheten att särskilja mellan suffusiva material, GBE-känsliga material, samt de som är självfiltrerande (och ej eroderar trots ett filter som tillåter fortgående erosion).

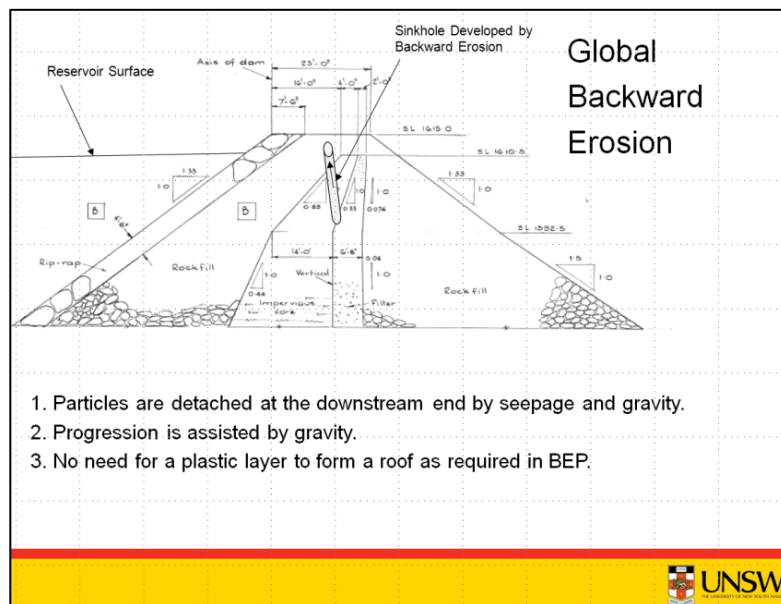


Fig. 1: Inledande skiss av randvillkor för GBE-försök (UNSW-Pwp 2012-08-08).

I maj 2016 kom granskningshandlingen för UNICIV report R-465 (Douglas et. al., 2016). Författarna efterfrågade synpunkter på rapporten. I egenskap av representant för

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

Energiforsk rörande utbytet med UNSW:s forskning, önskades förtydligande angående följande (jämför **figur 2**):

- kan "nätfiltret" ha påverkat resultatet i jämförelse med konventionell granulärt filter?
- kan den delvis hålgjorda utloppsplattan ha påverkat resultatet? (Nätfiltret anligger direkt mot utloppsplattan och mellan utloppshålen finns inget utrymme för genomströmning eller rörelse av partiklar).

I R-465 adresseras detta på följande vis:

"It is possible that the use of a base mesh rather than natural gravel base may have affected the results slightly however, the test results discussed later in the report were consistent with Ronnqvist (2015) and Wan & Fell (2004) who used natural gravel bases.

The use of the bottom plate with 50mm openings did not appear to affect the results. No localised effects from the plate were noted on excavation of the test samples. Only a small amount of sample was trapped right at the bottom within close proximity to the middle of the bridges between the openings".

Slutrapporten delgavs sponsorerna 2016-11-15, enligt delgivning i **figur 3**.



Fig. 2: Foto av underdel med utloppsplatta med nätfilter och delvis hålgjord platta (foto daterat 2014-02-26 i samband med platsbesök).

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

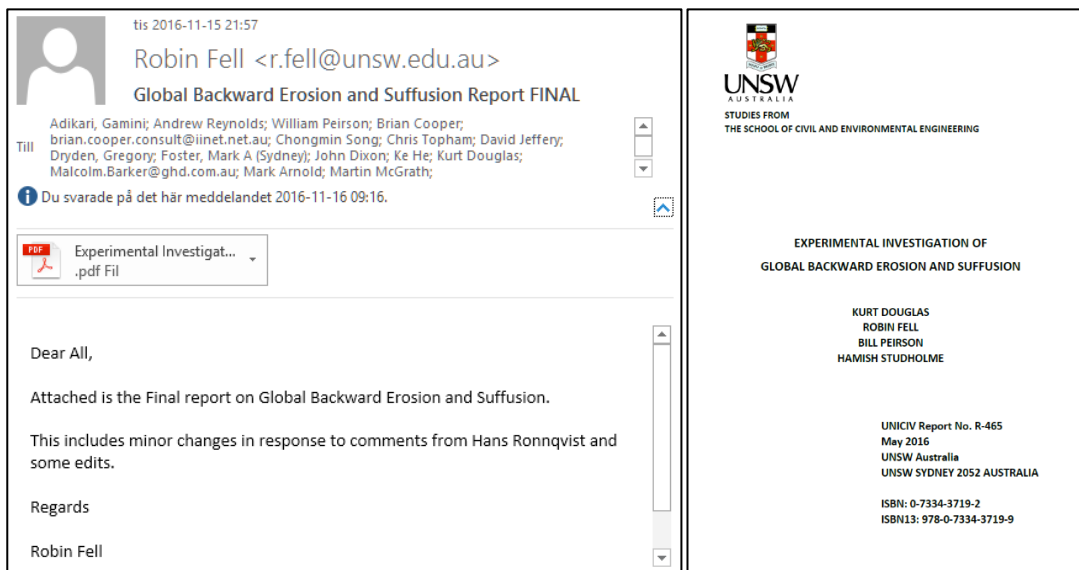


Fig. 3: Slutrapport R-465 och delgivnings-mail, 2016-11-15.

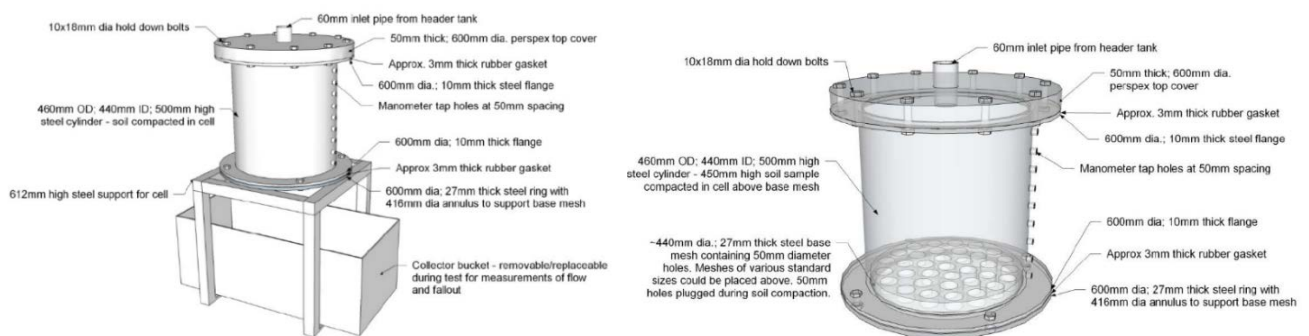


Fig. 4: Labuppställning, permeameter (Douglas et al, 2016).

5.2 Slutrapport: GBE, R-465

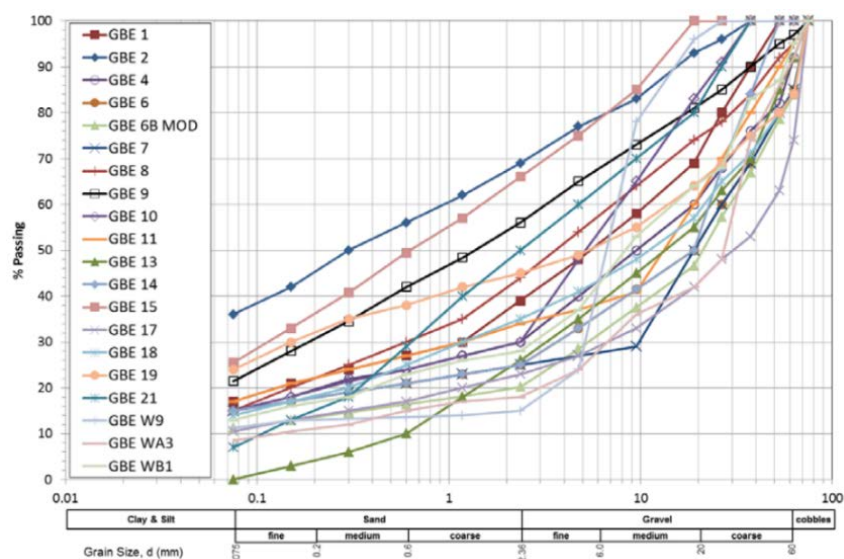
Syftet med UNSW:s forskningsprojekt var följande:

1. Öka förståelsen för inre erosions-förlopp i silt-sand-grus-jordmaterial.
2. Bestämma kritisk gradient och tidsaspekter i erosionsförloppet.
3. Bestämma hur suffusion och GBE påverkar kornstorleksfördelningen och permeabiliteten hos materialet.
4. Ta fram en metod som kan särskilja om ett material är känsligt för suffusion eller GBE.

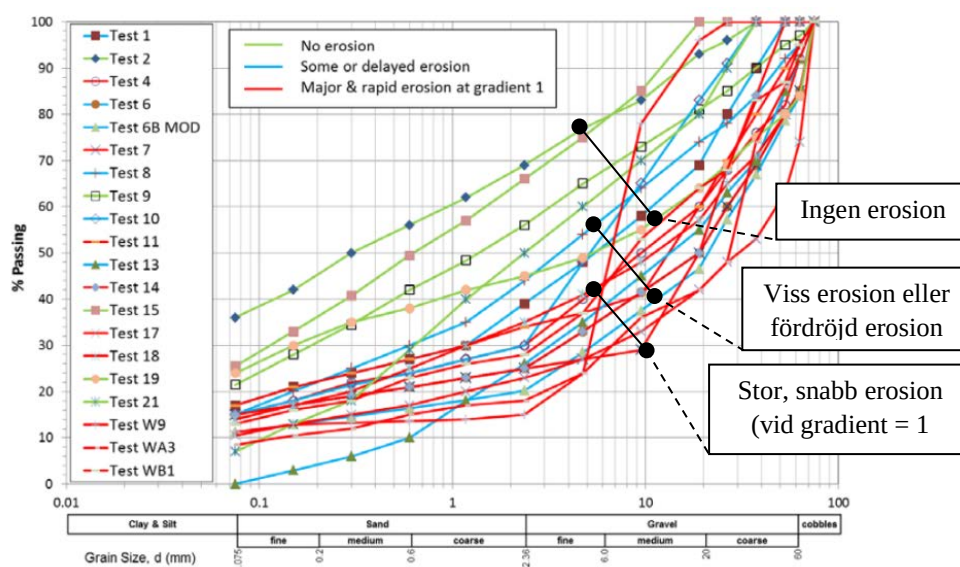
37 tester gjordes på 22 jordmaterial i permeametrar med diameter 450 mm och höjd 500 mm, se **figur 4**. Materialen var silt-sand-grusjordar, i allmänhet utan plasticitet men vissa hade låg plasticitet (material från Rowallan), se **figur 5A**. Testerna pågick från 15 minuter till 223 dagar med hydraulisk gradient som inledningsvis var 1 och som togs upp till maximalt 10 om nödvändigt.

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

Genom att bestämma kornstorleksfördelningen för jordlager samt analysera porvattentryck i testkroppen kunde samtliga jordmaterial konstateras uppvisa inre instabilitet, men med olika mått av erosion. De fann att enbart använda beskrivningen ”inre instabilitet” till suffusion är för snävt, och bör även avse andra inre erosionsmekanismer där erosionen pågår inom kornskelettet. Då tillkommer (global) bakåtskridande erosion (GBE, global backward erosion).



(A)



(B)

Fig. 5: (A) kornstorleksförning hos testmaterial, B) erosions-karakteristika hos testmaterialen (Douglas et al, 2016).

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

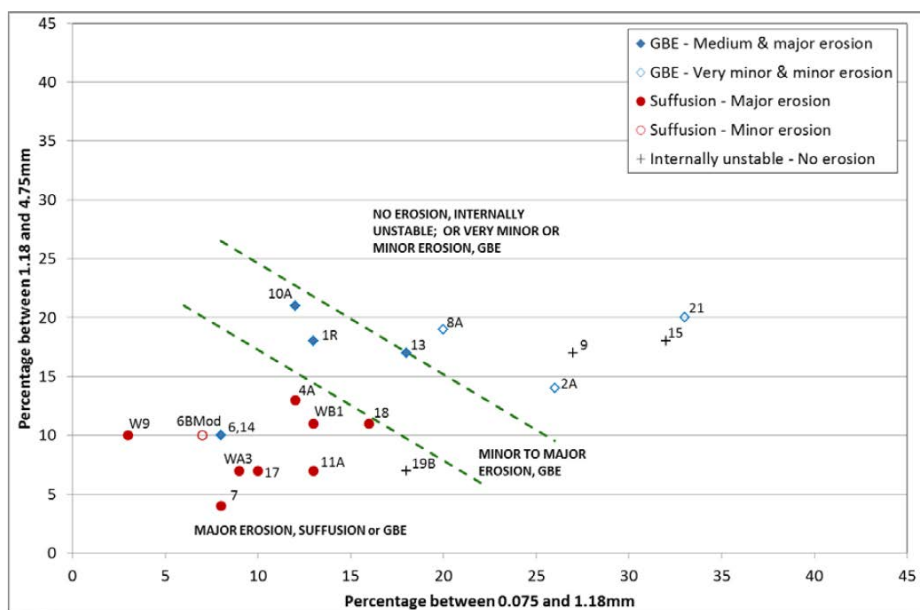


Fig. 6: Metod för bedömning av suffusion och GBE (Douglas et al, 2016).

Douglas et al, (2016) delade upp materialen enligt följande övergripande erosions-karakteristika:

- Suffusiva material (stor erosion, mycket snabbt erosionsförlopp vid låg gradient, i stort sett oberoende av nedströmsfilter), se **figur 5B**.
- GBE-material (långsamt erosionsförlopp som kan återaktiveras vid gradienthöjning, delvis beroende av nedströmsfilter), se **figur 5B**.
- Inre instabila material, ingen erosion eller mycket liten erosion, se **figur 5B**, (portrycksfördelningen indikerade på viss rörelse i testmaterialet, och gradient upp till 10 påfördes. Försöken pågick under lång tid (100–200 dagar).

Lärdomar från försöken:

- GBE-känsliga material är betydligt mer eroderbara vid mycket grova filter (3 x fortgående erosions-filter) jämfört med något finare graderade filter (1,2–1,5 x fortgående erosions-filter). Att hindra erosion av grovsand-delen är av avgörande betydelse.
- Suffusion kan förekomma även när filtret inte är grovt.
- Mycket höga lokala gradienter kan uppbyggas (upp till 60) till följd av självfiltrering.
- Viss plasticitet gör materialet något mindre erosionsbenäget jämfört med icke-plastiska material.
- Fortgående erosion i en *koncentrerad läck*a i ett silt-sand-grus-material leder till en gradvis större kanal som successivt eroderas, dvs ett fortgående förlopp som gradvis förvärras. Medan för suffusion och GBE transporteras delar av findelen

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

bort, men merparten av materialet kvarstår. Till följd kan permeabiliteten öka beaktansvärt, men kvarvarande material kommer begränsa flödet genom dammen. Det har betydelse för bedömning av sannolikhet för dammbrott.

Två försök gjordes för övrigt med mycket grovt filter (motsvarande ett D₁₅ ca 450 mm, som kan likställas till en grov stenfyllning) och dessa visar att vid låga gradienter (ca 1–2) kan förloppet vara stabilt, men en mindre ytterligare ökning ledde till ett snabbt sjunkhål-förlopp. Det innebär, enligt författarna, att sjunkhål kan inträffa efter lång drifttid trots att tidigare drifterfarenheter ej vittnar om sådan problematik, speciellt om dämningarnivåer nås som ej tidigare upplevts.

Douglas et al, (2016) presenterar en ny metod för bedömning av inre erosions-mekanism och kvalitativ erosionsmängd. I deras analys noterades att:

- merparten av partiklar och korn som eroderades var $D < 1,18$ mm.
- förloppet verkade beroende av fraktionerna grovsand – fingrus: 1,18–4,75 mm (som kontrollerar erosionen av korn $D < 1,18$ mm).

Metoden baseras alltså på kornstorleksfördelningen och delvis på förmågan att självfiltrera och tillämpbar på silt-sand-grus-material utan plasticitet. Metoden framgår av **figur 6**. Stor erosion till följd av suffusion eller GBE kan inträffa i silt-sand-grusmaterial om det brister i andelen grovsand-fingrus (1,18–4,75 mm) och fin-mellansand (0,075–1,18 mm), dvs. en kornfördelning med brant grus-sten-andel och flack fin-del (spränggradering i sandfraktionen). Ju mer jämngraderad materialet är desto mindre risk för suffusion och GBE. Författarna rekommenderar dock att vid viktiga beslut bör permeameter-försök utföras för att bekräfta materialets verkliga egenskaper.

6 R-465 JÄMFÖRT MED RÖNNQVIST (2015)

6.1 Allmänt

Från svenskt perspektiv är följande frågeställningar aktuella:

- Har UNSW undersökt material vars kornstorleksfördelning påminner om svenska fyllningsdammars tätjord?
- Finns paralleller hos resultaten mellan R-465 och svenska försök (från Rönnqvist, 2015)?
- Kan resultat från R-465 användas för att underbygga slutsatser gjorda vid svenska försök (från Rönnqvist, 2015), och vice versa?

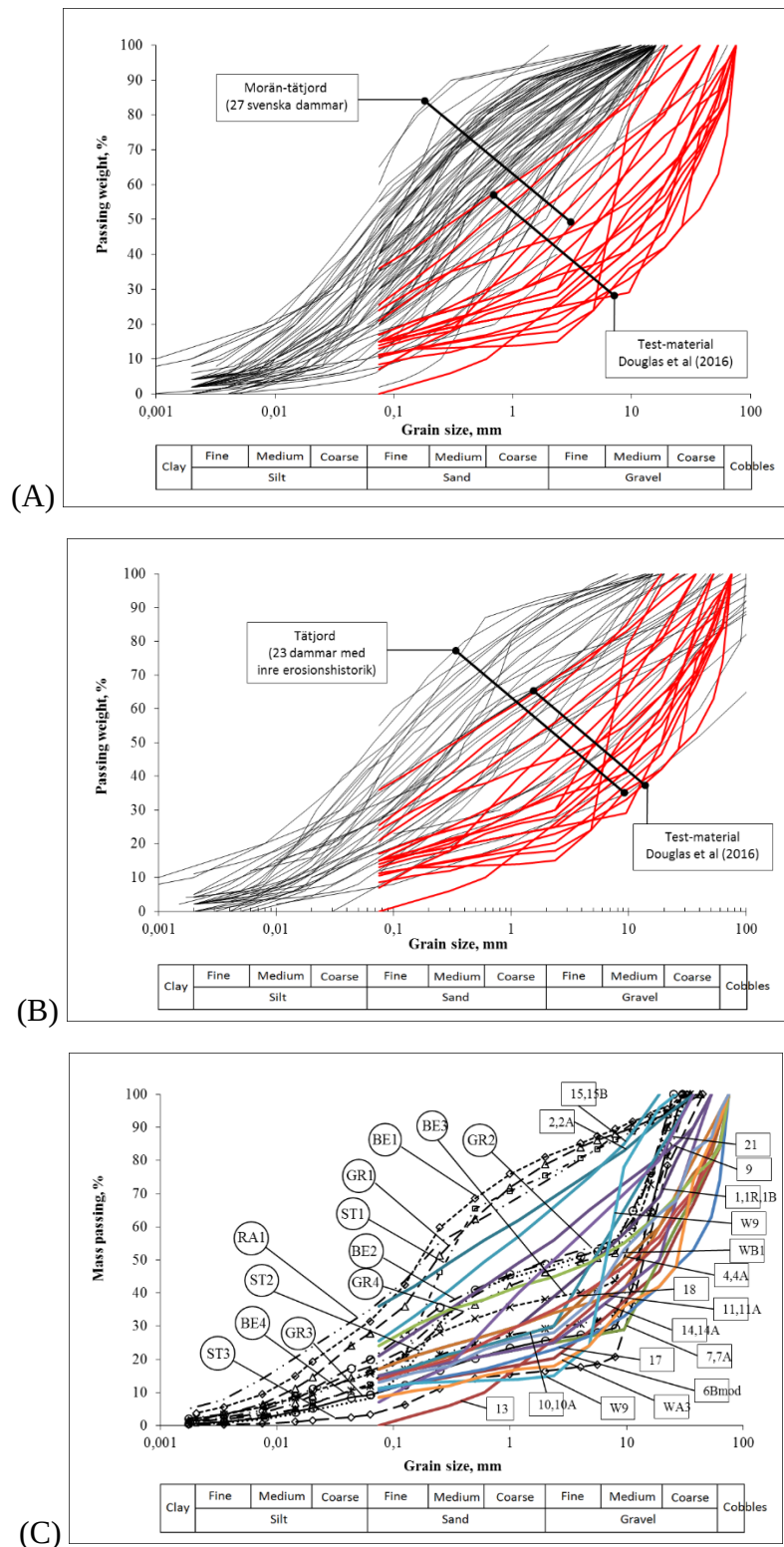


Fig. 7: UNSW R-465 testmaterial i jämförelse med A) 27 svenska fyllningsdammars tätjord ($d < 16$ mm) (från Rönqvist, 2002), B) 23 internationella dammar med inre erosions-historik, och C) 12 testmaterial av morän från Rönqvist (2015).

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

6.1 Testmaterial, R-465

UNSW:s 22 testmaterial framgår av **figur 5B**. För vissa material gjordes flera tester (dvs. mot olika filter). Siktdata för $D < 0,075$ mm finns ej, finjordshalten (material $< 0,075$ mm) varierar från 0 – 36 % och $D_{\max}$ 19 mm till 75 mm. I jämförelse med svenska fyllningsdammars tätjord (från Rönnqvist, 2002), se **figur 7A**, så noteras att UNSW:s material är grovkornigare. Observera att tätjordskurvorna bara är siktade till ca 10–16 mm vilket innebär att de totalsiktade kurvorna troligen är mer likartade UNSW:s. Jämförs med tätjordar till 23 fyllningsdammar med inre erosions-historik (från Rönnqvist et al, 2014), se **figur 7B**, så syns god överensstämmelse. Av **figur 7C** framgår för övrigt att Rönnqvist (2015) data kompletterar UNSW:s material och bra jämförelse kan göras.

6.1 UNSW:s R-465 data och Rönnqvist (2015) data

Eftersom $D < 0,075$ mm saknas för UNSW:s testmaterial kan för vissa material ej jämförelse göras med Rönnqvist (2015). Det beror på att Kenney-Laus metod (Kenney and Lau, 1985, 1986) erfordrar analys av kornkurvan upp till 20 % passerande viktmängd, som då alltså saknas. Metoden utvecklades sedermera av Li-Fannin (Li and Fannin, 2008).

Tabell 1 sammanställer resultatet av UNSW:s labtester. För vissa av materialen användes olika grovhet hos filtret. För att underbygga sina egna resultat så använde sig Douglas et al (2016) av Rönnqvist (2015) data, se **figur 8A**, vilket gav god samstämmighet mellan metodens prediktion av erosionsmängd och mekanism och försöksresultat.

Motsvarande kontroll kan göras med Rönnqvist (2015) ”modifierade Li-Fannin metod” baserat på Kenney-Lau metoden. Den modifierade Li-Fannin inbegriper en gräns till inre instabilitet i form av $H/F < 0,68$ och $0,68 \leq H/F < 1,0$ definierar en övergångszon till stabilt, se **figur 8B**. UNSW:s data (enligt **tabell 1**) faller även här ut väl eftersom samtliga av UNSW:s material som var suffusiva identifierades och flera av de som genomgick GBE bedömdes vara i övergångszonen eller stabila. F_f i **figur 8B** avser ”finer fraction”, dvs. findelens storlek, och om findelen är för stor (ca $F_f > 35$ %) så är troligen ej materialet mottagligt för suffusion eftersom de grova kornen ”flyter” i den finkorniga massan. Eftersom den ”modifierade Li-Fannin” har för avsikt att identifiera grovkorniga tätjordsmaterial som är känsliga för suffusion så ger UNSW:s tilläggsdata ökat förtroende för metoden och tillvägagångssättet.

Att döma av **figur 8B** kan det finnas fog för att dela upp zonen ”Potentially unstable”, i dels den befintliga zonen (Potentially unstable) och en ny zon ”Suffusive” (vid $H/F < \sim 0,4$ till 0,5) där materialen uppvisat tydlig inre instabilitet/suffusion. Mer analys erfordras dock för att befästa detta påstående.

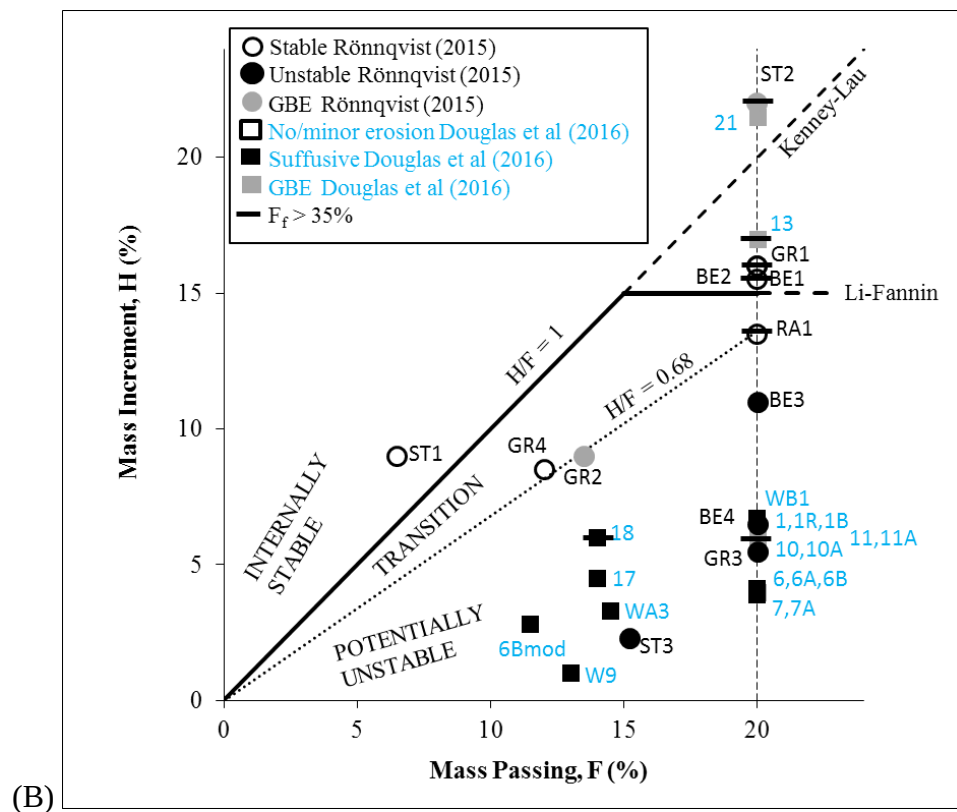
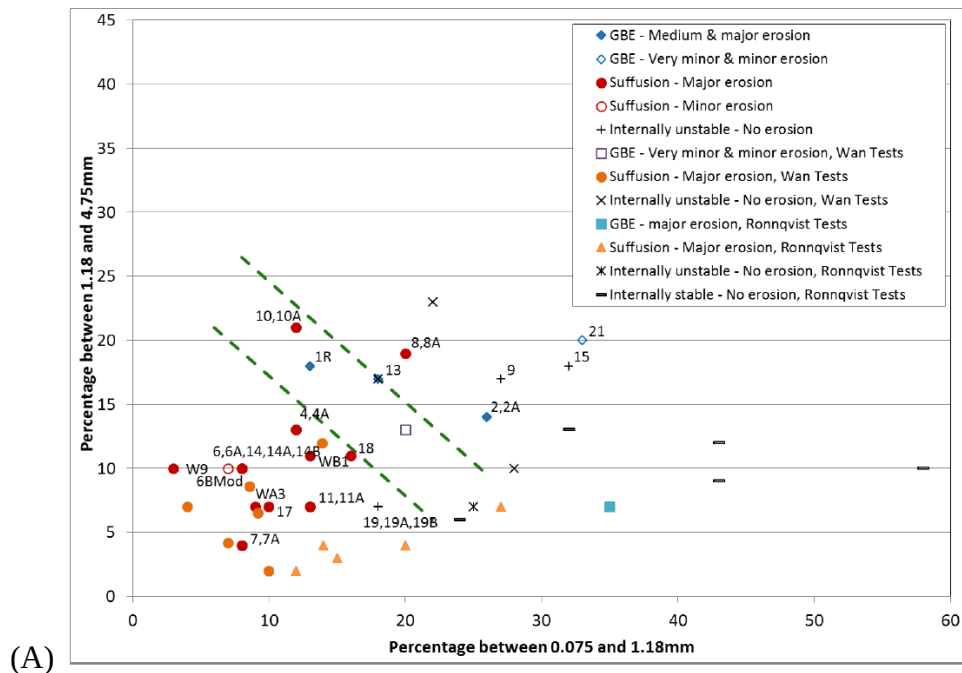


Fig. 8: A) UNSW-metoden med Rönnqvist (2015) data (från Douglas et al, 2016), och B) modifierad Kenney-Lau/Li-Fannin (baserat på Rönnqvist, 2016) med UNSW data.

Uppdragsnr: 1501	Fortsatt utbyte med UNSW: GBE-tester	
Datum: 2017-02-22		
Status: Slutrapport		

Tabell 1: Sammanställning av UNSW:s GBE-tester (Douglas et al, 2016).

Test	Finjordshalt ($d < 0,075$ mm) (%)	Findel (finer fraction, F_i) (%)	Erosionsmekanism	Mängd erosion
11,11A	17	41	Suffusion	Stor
21	7	n/a	GBE	Mycket liten
1, 1R, 1B, 1Row	17	30	GBE	Medium
10, 10A	15	30	GBE	Medium-stor
18	14	40	Suffusion	Stor
4, 4A	15	30	Suffusion	Stor
WB1	13	27	Suffusion	Stor
14, 14A	15	25	Suffusion (GBE vid grovt filter)	Stor
W9	11	15	Suffusion	Stor
7, 7A	15	29	Suffusion	Stor
6, 6A, 6B	15	25	Suffusion (GBE vid grovt filter)	Stor
17	11	27	Suffusion	Stor
6Bmod	11	20	Suffusion	Medium
WA3	9	17	Suffusion	Stor
13	0	55	GBE	Liten-medium

7 REFERENSER

Douglas, K., Fell, R., Peirson, B., Studholme, H. (2016) Experimental investigation of global backward erosion and suffusion, UNICIV Report no. R-465, University of New South Wales, Australia.

Kenney, T.C., Lau, D. (1985) Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, 22(2), pp.215-225.

Kenney, T. C., Lau, D. (1986) Internal stability of granular filters: Reply, Canadian Geotechnical Journal, 23(3), pp. 420-423.

Li, M., Fannin, R. J. (2008) Comparison of two criteria for internal stability of granular soil. Canadian Geotechnical Journal, 45, pp. 1303-1309.

Rönnqvist, H. (2002) Fyllningsdammars känslighet för inre erosion, Examensarbete, KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Rönnqvist, H. (2015) On the assessment of internal erosion of dam cores of glacial till, Doktorsavhandling, Luleå University of Technology, Luleå.

Rönnqvist, H., Fannin, R.J., Viklander, P. (2014) On the use of empirical methods for assessment of filters in embankment dams, Géotechnique Letters, 4, pp.272-282.