



Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering

Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11,
rev 2016-05-18 Slutrapport
Upprättad av: Hans Rönnqvist

Kund:
Energiforsk AB

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

Kontakt:
Hans Rönnqvist
hans.romnqvist@rqv.se

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

INNEHÅLLSFÖTECKNING

1	INLEDNING.....	2
2	BAKGRUND	3
3	OMFATTNING AV UPPDRAGET	3
4	GENOMFÖRDA MÖTEN VID UNSW	3
5	FORSKNINGSPROJEKT VID UNSW	4
5.1	Bakåtskridande erosion	4
5.1.1	Bakåtskridande erosion i undergrunden (Backward Erosion Piping – BEP)	4
5.1.2	Bakåtskridande erosion i dammkroppen (Global Backward Erosion – GBE)	6
5.2	Erosion i utskovskanaler till följd av tappning.....	8
5.3	Sprickbildning i dammar	8
6	STUDIEBESÖK FEB 2014.....	9
7	AV VIKT FÖR SVENSKA FÖRHÅLLANDEN.....	11

Bilagor:

Bilaga 1 Utdrag ur Swedcolds nyhetsbrev #2 2014

1 INLEDNING

RQV Teknik AB (RQV) har av Energiforsk fått uppdraget att slutrapportera utbytet med University of New South Wales (UNSW), Australien, rörande UNSW:s pågående forskning om inre erosion. Uppdraget påbörjades 2013 av Hans Rönnqvist (då doktorand vid Luleå Tekniska Universitet, LTU). I det följande ges en sammanställning av forskningen, dess syfte och övergripande resultat.

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

2 BAKGRUND

Energiforsks dammsäkerhetsprogram deltar i finansiering av 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 löper inpå 2016. Följande forskningsprojekt har utförts:

- Bakåtskridande erosion i undergrunden.
- Bakåtskridande erosion i dammkroppen (s.k. global backward erosion).
- Erosion av utskovskanaler i samband med avbördning.
- Sprickbildning i dammar.

3 OMFATTNING AV UPPDRAGET

Enligt beställningen på anbudet "Bevakning av / utbyte med UNSW-forskning inom inre erosion", daterat LTU 2013-06-13, ingår följande i uppdraget:

1. Bevakning/genomläsning/återrapportering av resultat/rapporter utsänt från UNSW.
2. Platsbesök/bevakning / återrapportering vid UNSW i samband med sponsormöte.
3. Avrapportering.

4 GENOMFÖRDA MÖTEN VID UNSW

Möten för sponsorerna (Management Committee meetings) har hållits vid följande tillfällen:

- 2012-08-08,
- 2013-04-12,
- 2014-02-25 (Hans Rönqvist deltog),
- 2014-08-12, och
- 2015-04-22.

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

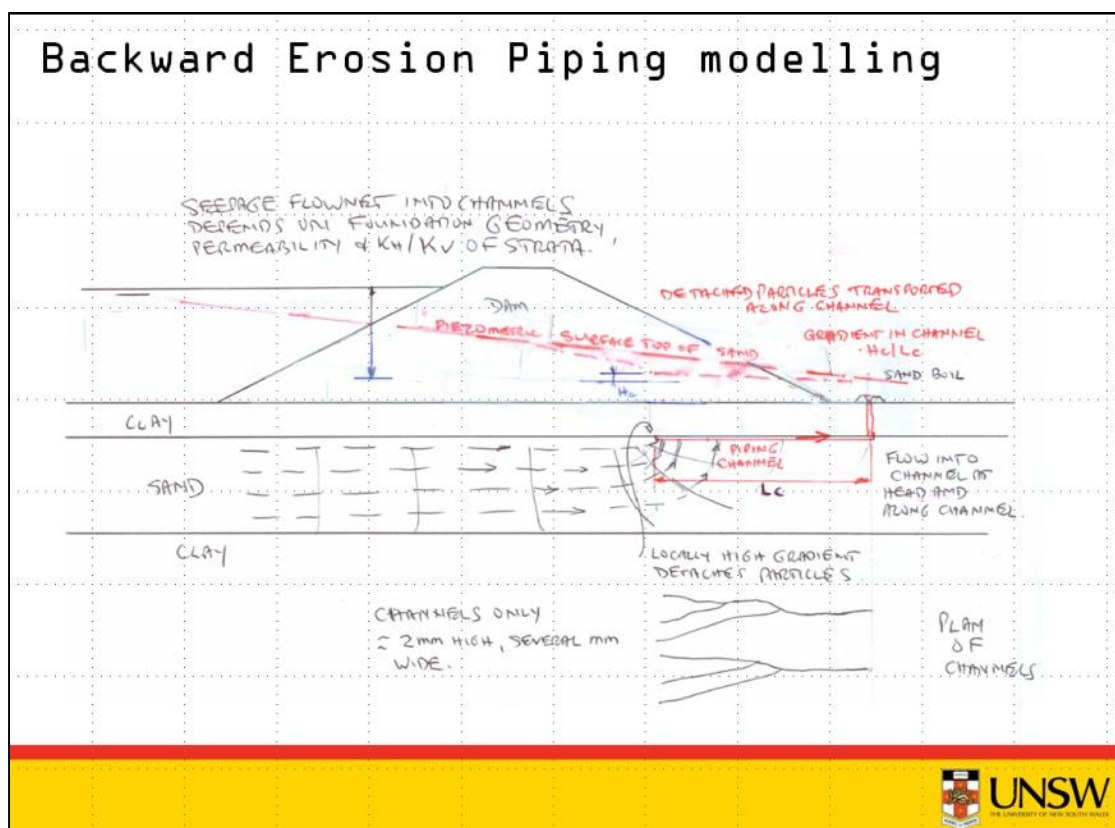
5 FORSKNINGSPROJEKT VID UNSW

5.1 Bakåtskridande erosion

Forskningen fokuserar på inre erosion i icke-plastiska jordmaterial i fyllningsdammar, antingen i dess grundläggning eller dammkropp. Avsikten är att dels bredda perspektivet från den generella mekanismen bakåtskridande erosion till nyanserade erosionsförlopp för bakåtskridande erosion i undergrunden, i dammkroppen och suffusion, och dels förtydliga gränsdragningen mellan dessa som i dagsläget ej är tydligt definierade. Speciellt fokus har varit på månggraderade siltiga sandjordar samt siltiga, sandiga och grusiga material. Syftet är att ta fram metoder för utvärdering av sannolikhet för inre erosion givet dammgeometri, grundläggning, materialslag, plasticitet, packning och lastförutsättningar.

5.1.1 Bakåtskridande erosion i undergrunden (Backward Erosion Piping – BEP)

Doktorand: Rebecca Allan, UNSW. Fokus på forskningen ligger på den bakåtskridande erosionens utloppsförhållande, och hur den inverkar på erosionsförloppet. Jordmaterial som undersökts är generellt av sandfraktion, men även månggraderade material undersöktes. **Figur 1** visar en inledande skiss till forskningsprojektet.

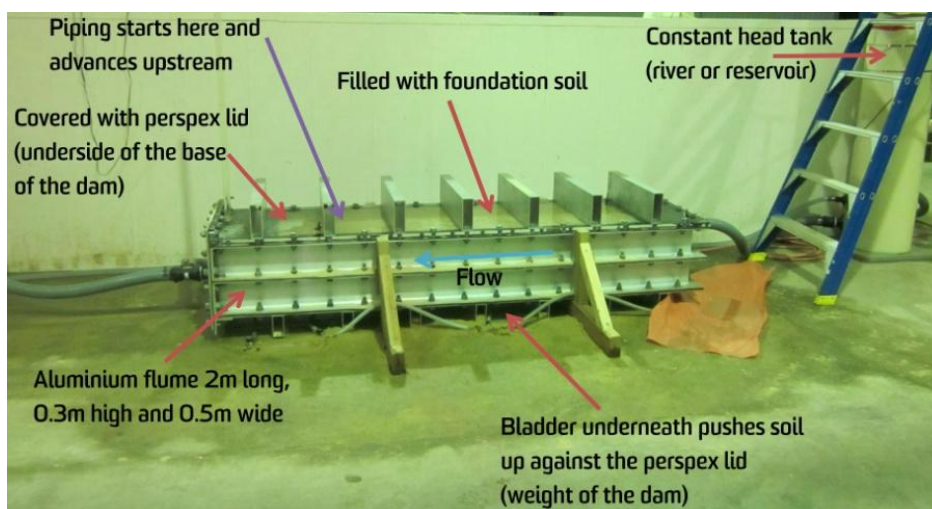


Figur 1 Inledande skiss av planerad forskning (UNSW-Pwp 2012-08-08).

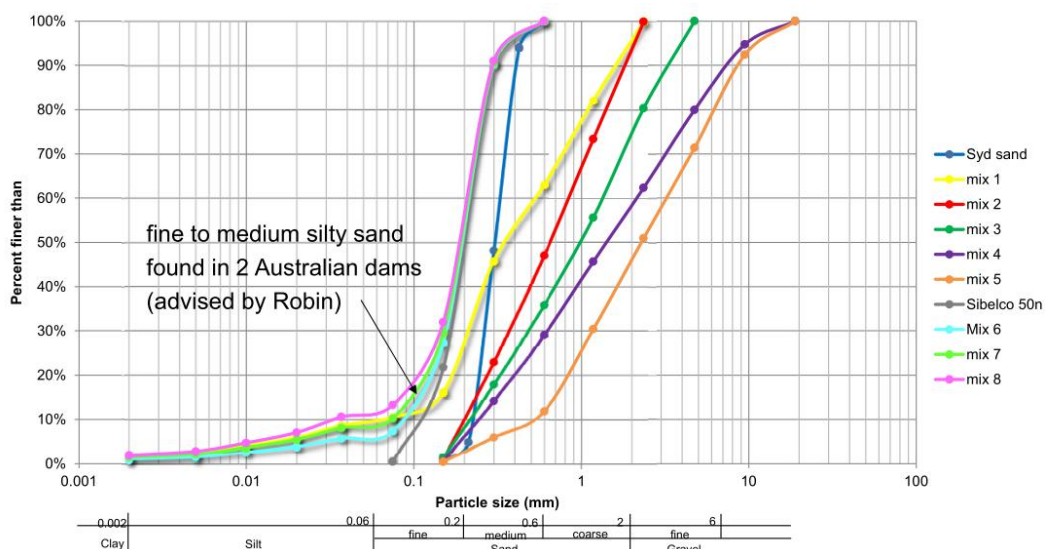
Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

UNSW:s litteratursökning fann bl.a. följande:

- Bakåtskridande erosion uppkommer i genomsläppliga materiallager.
- Bakåtskridande erosion i undergrunden fortskrider i flera mindre kanaler snarare än en större ”pipe”, och övergår till en sammanhängande pipe då kanaler når vattenkällan.
- Kritisk gradient erfordras, vid lägre gradient avslutas processen.
- Mönster för bakåtskridande erosion identifierade.



Figur 2 Labuppställning, bakåtskridande erosion i undergrunden (UNSW-Pwp 2013-04-12).



Figur 3 Exempel på material som undersökts: ensgraderade sandfraktioner och något mer bredgraderade sand och grusmaterial (UNSW-Pwp 2015-04-22).

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

Labuppställningen visas i **figur 2** och undersökta material i **figur 3** (per april 2015). Utloppsförhållanden (genom ett tätare överliggande material) som undersöktes var: i) cirkulärt mynningshål, ii) dike (slits), iii) horisontell öppen yta, och iv) sluttande öppen yta. Slutsatser från UNSW:s forskning:

- Vid cirkulär mynning och slits initierades erosionen vid en gradient lägre än kritisk.
- Vid horisontell och sluttande mynning erfordrades full kritisk gradient för initiering av erosion.
- Kanaler meandrar, och multipla kanaler mer troligt vid horisontell och sluttande mynning.
- När kanaler når vattenkällan så sammangår kanaler till en pipe.
- Månggraderade material kräver högre gradient för att initieras.
- Vid $C_u = D_{60}/D_{10} > 6,5$ (och gradient upp till 2,5) så kan bakåtskridande erosion i undergrunden ej fortlöpa till fullt brott.
- Tid för brott är mycket kortare för månggraderade material än för ensgraderade.

5.1.2 Bakåtskridande erosion i dammkroppen (Global Backward Erosion – GBE)

Prof. Emeritus Robin Fell, UNSW. Genomförs i fyra permeametrar med diameter 450 mm. Av fokus är tidsaspekten i erosionsförloppet, vilket innebär att flera försök pågått under lång tid, upp till flera månader. Portryck, gradient och flöde mäts under försökens gång. Global bakåtskridande erosion skissas i **figur 4**.

Syftet är dels att undersöka grunden till bakåtskridande erosion i dammkroppen (GBE) och hur den anknyter till suffusion (erosion av finmaterial i kornskelettet av grövre partiklar), och dels ta fram utvärderingsmetoder. Undersökta material (per april 2015) visas i **figur 5**. Observationer / slutsatser från UNSW:s forskning:

- Inre erosion kan pågå utan att material eroderar ut från provet. Förloppet kan ändå förändra kornstorleksfördelningen och permeabilitet i materialet.
- Förloppet är tidsberoende, vilket innebär att tidigare labtester som pågått under kort tid kan vara missvisande.
- Testerna gjordes mot ett filter (sikt/mesh) som teoretiskt tillåter fortgående erosion. Självfiltrering uppkom trots det, vilket kan innebära att gränsen för fortgående erosion har en inbyggd säkerhetsfaktor.

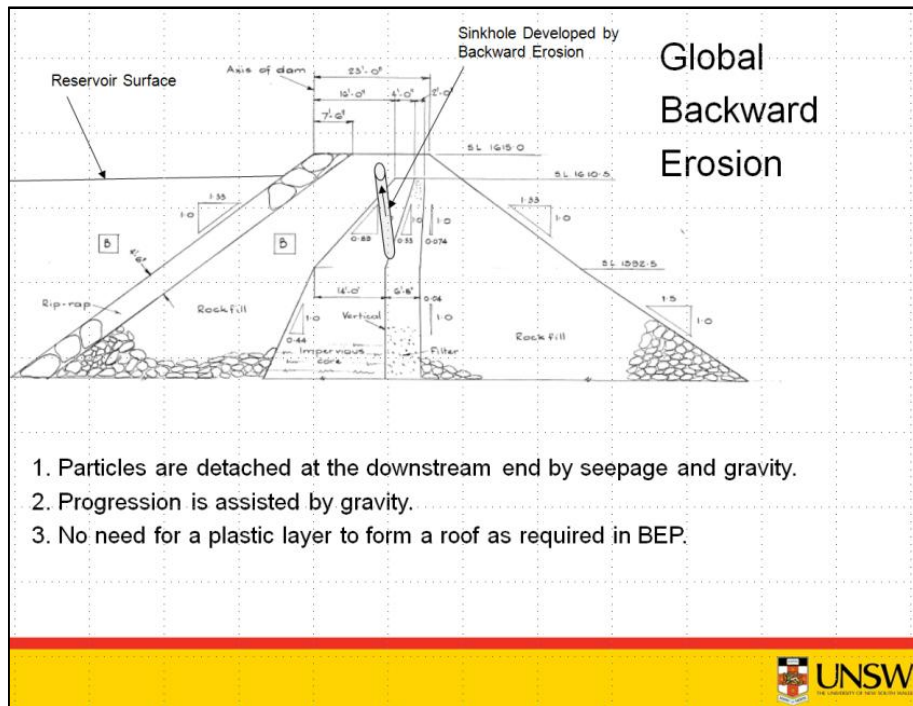
UNSW rapporterar att möjlighet kommer finnas att särskilja mellan material som kan genomgå suffusion, som kan genomgå bakåtskridande erosion, och som är självfiltrerande (och ej eroderar trots ett filter som tillåter fortgående erosion).

Uppdragsnr: 1501

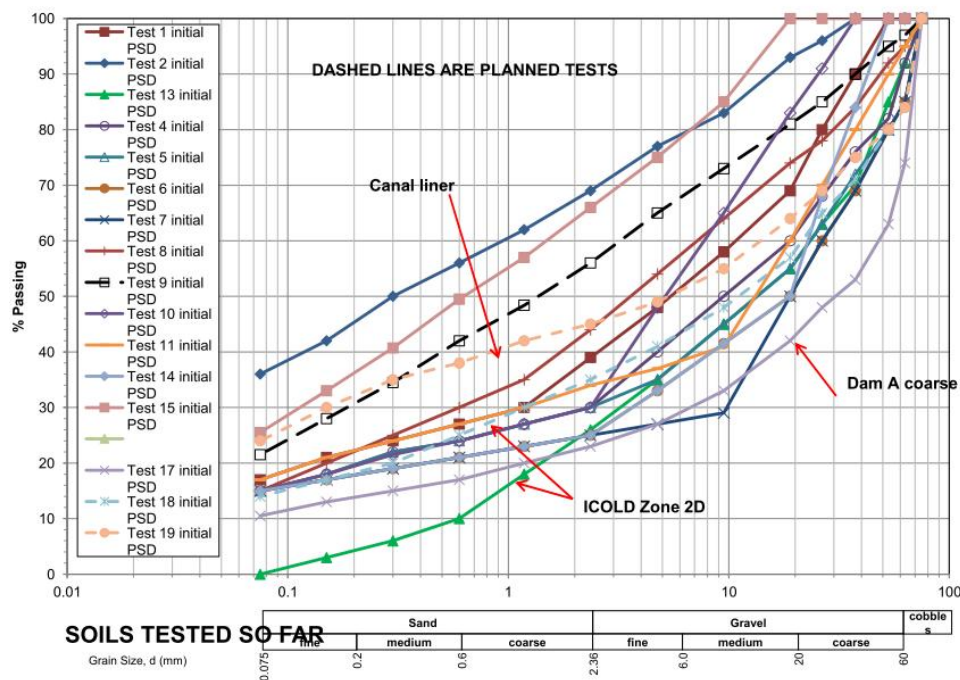
Datum:
2015-12-28, rev 2016-04-11,
rev 2016-05-18

Status: Slutrapport

Forskningsutbyte med
UNSW: slutrapportering



Figur 4 Inledande skissering av randvillkor för GBE-försök (UNSW-Pwp 2012-08-08).



Figur 5 Hittills undersökta material, GBE-försök (UNSW-Pwp 2015-04-22).

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

5.2 Erosion i utskovskanaler till följd av tappning

Doktorand: Steven Pells, UNSW. Genomförs i en storskalig ränna som kan modifieras på flera sätt, t.ex. kanallutning. Strömningsinducerade krafter på block undersöks. Förutsättningarna är följande: utskoven avbördar genom utskovskanaler av oförstärkt berg som antas ha motståndskraft för frekvent förekommande högflöden. Trots det förekommer oväntad erosion. Forskningen baseras på fallstudier och laborationer.

5.3 Sprickbildning i dammar

Doktorand: Ke He, UNSW. Sprickbildning i fyllningsdammarna kan leda till en koncentrerad läcka, och syftet med forskningen är att utreda läget på sprickbildningen, dess djup och bredd, med numerisk modellering. Kritiska zoner identifieras, t.ex. områden med dragspänning eller låg effektivspänning (**figur 6**) och sprickors propagering undersöks.

UNSW:s litteratursökning fann bl.a. följande:

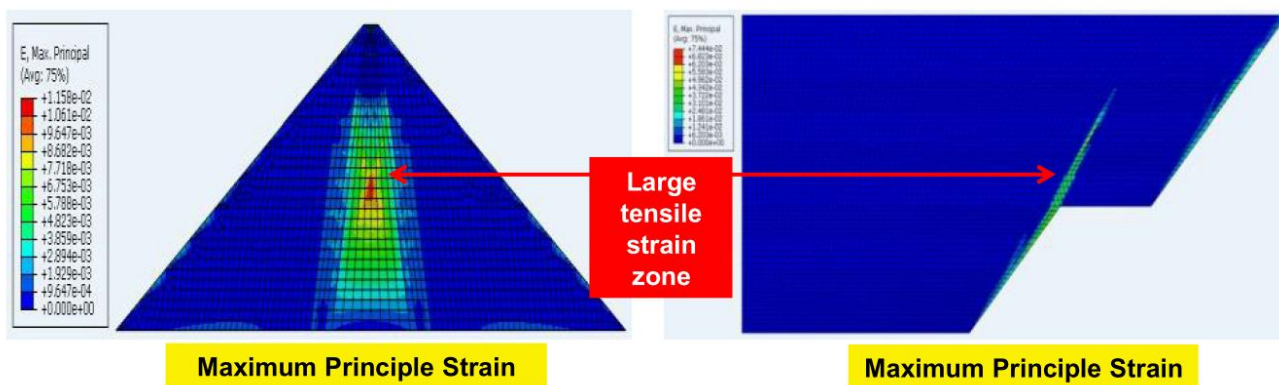
- 80-90 % av den totala sättningen i fyllningsdammarna uppkommer under byggskedet.
- Spänningsförhållandena som byggs upp under byggskedet bestämmer sannolikheten för zoner med låg effektivspänning och sprickor.
- Zoner med låg effektivspänning kommer högst sannolikt uppkomma vid fyllningsdammars anfang.
- Längsgående sprickor kan utvärderas med avseende på fyllningsdammens tvärsnitt. Kan försvaga ett materials hållfasthet när vatten tränger in i sprickan.
- Tvärgående sprickor kan utvärderas med avseende på fyllningsdammens längdsnitt och grundläggningsprofil. Kan skapa läckanvisningar och koncentrerad läcka.

Observationer / slutsatser från UNSW:s forskning:

- Sprickbildning kan uppkomma till följd av dragspänning och låg effektivspänning nära anfang pga. sidoförskjutning.
- Dragspänning kan uppkomma vid anfang till följd av avsatser eller ojämn undergrund.
- Zoner med dragspänning vid anfangen blir större med brantare anslutning, men utbredningen av zonen blir mindre.
- Graden av dragspänning ökar tydligt med brantheten hos anfanget.
- Ju närmare ojämnheten i grunden är till krönet, desto större blir zonen med dragspänning.
- Dragpåkänningen och valvbildningen ökar för smala tät kärnor.

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

- Dragspänningen ökar i tåtkärnan men valvbildningen minskar om det anslutande filtret och stödfyllning är mindre styva (låg E-modul).



Figur 6 Områden med dragspänning och låg effektivspänning (UNSW-Pwp 2014-02-25).



Figur 7 Water Research Laboratory (WRL), Manly Vale, Sydney. Laboratoriehall (vänster) och uppställningsplats för jordmaterial (höger).

6 STUDIEBESÖK FEB 2014

Ett referat från studiebesöket publicerades i Swedcolds nyhets brev #1, 2014, och återges i **Bilaga 1**. Laboratorieförsöken vid UNSW genomfördes vid Water Research Laboratory (WRL) i Manly Vale norr om Sydney (**figur 7**).

Hans Rönqvist besökte WRL i februari 2014 i samband med sponsormötet 2014-02-25. Dag 2 (26 feb) deltog Hans vid ett försök då global bakåtskridande erosion testades. Det

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

månggraderade jordmaterialet förbereddes då genom att mixa ingående fraktioner i en betongblandare till rätt sammansättning och vattenkvot (**figur 8**), koning och kvadrering för att minimera separation, och sedan iläggning lagervist i permeametern och inpackning (**figur 9**). Testet genomfördes med ett genomflöde på en knapp liter per sekund och materialet genomgick inre erosion (**figur 10**).



Figur 8 Pågående blandning av testmaterial i storskalig mixer.



Figur 9 Sortering av jordprov (vänster), iläggning i permeameter (höger) och manuell packning (nedre).

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		



Figur 10 Igångsättning av test och uppsamling av genomläckt vatten och eroderade partiklar.

7 AV VIKT FÖR SVENSKA FÖRHÅLLANDEN

Där svenska fyllningsdammar grundläggs på naturlig mark eftersträvas generellt att undergrunden då utgörs av material som motsvarar tätkärnan, i sammansättning och genomsläpplighet. Det är inte alltid möjligt att uppnå, t.ex. när djup till lämpligt grundläggningmaterial är för stort eller linser eller lager förekommer på stort djup i grunden eller i anfangen. Beroende på geologiskt ursprung hos jordmäktigheter över berg i älvfåror, så kan formationerna utgöras av mer eller mindre månggraderade material, från moränjord till sand- och grusmaterial med inslag av silt.

Av vikt för svenska förhållanden, där relativt månggraderade material förekommer i undergrunden, så visar forskningen vid UNSW alltså på att sådana behöver en högre gradient för att initieras jämfört med ensgraderade sandfraktioner. Och ju större månggradering desto mindre risk för att en initierad bakåtskridande erosion ska utvecklas till fullö (dvs. $C_u = D_{60}/D_{10} > 6,5$ och gradient upp till 2,5). Dock bör det noteras att tidsförloppet från en initierad bakåtskridande erosion i ett månggraderat material är snabbare till brott än för det ensgraderade materialet. Vidare är det troligt att även ensgraderade sandformationer kan förekomma i Svenska dammars undergrunder.

Vad gäller bakåtskridande erosion i dammkroppen (s.k. global bakåtskridande erosion) så är testerna vid UNSW högst relevanta. UNSW har undersökt material med kornfördelningar som överensstämmer med H. Rönqvist forskning vid Luleå Tekniska Universitet på grovkorniga moränmaterial (avhandling: "On the assessment of internal erosion of dam cores of glacial till",

Uppdragsnr: 1501	Forskningsutbyte med UNSW: slutrapportering	
Datum: 2015-12-28, rev 2016-04-11, rev 2016-05-18		
Status: Slutrapport		

2015 LTU), dvs. med siktkurvor som förekommer i befintliga dammars tätkärnor (på den grova delen av kurvskaran). Trots att en del analys kvarstår för UNSW så rapporteras att det ska gå att särskilja material som är känsliga för suffusion från de som snarare är mottagliga för bakåtskridande erosion, samt förbättra möjligheten att avgöra om självfiltrering kan uppstå ("självläkning").

Vad gäller forskningen kring sprickbildning så är även den relevant, och poängterar vikten av att bedöma styvhet och elastiska egenskaper hos materialzoner i dammkroppen, samt utvärdera potentiella svagheter som uppkommer till följd av dammens längdsektion och tvärsektion. Sammantaget kan alltså zoner med dragpåkning uppkomma vid ojämnheter i grundläggningen och i tätkärnans mitt i tvär- och höjddled. Sådana zoner kan leda till sprickor men beror av materialets draghållfasthet (motståndskraft till dragspänning).

/Hans Rönnqvist

RQV Teknik AB

Bilaga 1 Utdrag ur Swedcolds nyhetsbrev #1 2014

UR INNEHÅLLET:

Ny reglering av dammsäkerhet SID 2

Sverige och Australien samarbetar om dammsäkerhet SID 3

Kartläggning av erosionsprocessen SID 4 – 5

Geografisk analys av drivgodsrisker i Piteälven SID 6 – 7

Sverige och Australien samarbetar om dammsäkerhet

Sedan mitten av 1990-talet har University of New South Wales (UNSW) i Australien aktivt forskat om inre erosion i fyllningsdammar. Svenska Elforsk är delsponsor av verksamheten. En rad spännande forskningsprojekt har hittills genomförts.

I egenskap av Elforsks representant har doktoranden Hans Rönnqvist under februari 2014 haft möjlighet att delta på plats vid sponsormöte och vid ett försök där global bakåtskridande erosion studerades.



Hans Rönnqvist



Laboratorieförsöket genomfördes vid Water Research Laboratory i Manly Vale norr om Sydney.

Bild 1 Water Research Laboratory (WRL) i Manly Vale norr om Sydney.

Vid försöket förbereddes det månggraderade jordmaterialet genom att mixa ingående fraktioner i en betongblandare till rätt sammansättning, vattenkvot, koning och kvadrering för att minimera separation, och sedan iläggning lager för lager i permeameteren (ett rör som fylls med det material vars vattengenomsläpplighet med mera man vill undersöka) och inpackning (se bild 3). Testet genomfördes med ett genomflöde på en knapp liter per sekund och materialet genomgick inre erosion (se bild 4).

Hans Rönnqvist kommer fortsättningsvis följa den aktuella forskningen och återrapportera till Elforsk när det gäller dess framskridande och relevans för våra svenska förhållanden.

Forskningen om inre erosion leds av prof. Robin Fell, Dr Kurt Douglas och laboratoriechefen Dr Bill Peirson.

/ Hans Rönnqvist doktorand LTU och konsult WSP



Bild 2 Studiebesök i laboratoriet i samband med sponsormöte.



Bild 3 Iläggning och pågående packning och iordningställande av testmaterial vid WRL inom University of New South Wales.



Bild 4 Pågående testning av bakåtskridande erosion vid WRL inom University of New South Wales.

FORSKNINGSPROJEKT INOM FÖLJANDE OM- RÅDEN PLANERAS SLUTFÖRAS UNDER ÅR 2015:

- **Erosion av utskovskanaler i samband med avbördning** Projektet genomförs av doktorand Steven Pells i en storskalig ränna som kan modifieras på flera sätt. Strömningsinducerade krafter på block, t.ex. kanallutning, undersöks.
- **Bakåtskridande erosion i undergrunden** Projektet genomförs av doktorand Rebecca Allan, hittills har fokus legat på utloppsförhållandens inverkan på erosionsförloppet för ett typiskt sandmaterial. Försöken övergår nu till att undersöka andra slags material, bland annat ett månggraderat material.
- **Bakåtskridande erosion i dammkroppen (global backward erosion)** Projektet genomförs av prof. Robin Fell och Dr. Kurt Douglas i fyra permeametrar med en diameter på 450 millimeter som körs parallellt. Fokus är tidsaspekten i erosionsförloppet, vilket innebär att flera försök pågått under lång tid, upp till flera månader. Portryck, gradient och flöde mäts under försökens gång.
- **Sprickbildning i dammar** Projektet genomförs av doktorand Ke He med numerisk modellering. Nästa steg är att utreda sprickors propagering i dammar.