

Rapport  
**R-19-25**  
April 2020



# Optimering av buffertpellets för KBS-3

## Laboratorieförsök på fyra olika pellets

**Christel Lundgren**  
**Lars-Erik Johannesson**

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL  
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna  
Phone +46 8 459 84 00  
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING



ISSN 1402-3091

**SKB R-19-25**

ID 1873543

April 2020

# **Optimering av buffertpellets för KBS-3**

## **Laboratorieförsök på fyra olika pellets**

Christel Lundgren, Lars-Erik Johannesson

Svensk Kärnbränslehantering AB

*Nyckelord:* KBS-3, Bentonit, Bentonitpellets, Laboratorieförsök.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

© 2020 Svensk Kärnbränslehantering AB



# Sammanfattning

Denna rapport beskriver utförda laboratorieförsök med pellets av bentonit. Buffertpellets i testerna utgjordes dels av BARA-KADE, en natriumdominerad bentonit med ursprung från Wyoming, USA, samt CaBen, en kalciumdominerad bentonit med ursprung från Bulgarien. Av dessa bentonitmaterial tillverkades två olika pelletstyper, extruderade och kompakterade pellets.

Försöken genomförs i en testlåda delvis tillverkad av plexiglas. Dimensionerna på lådan är  $1\,000 \times 1\,000 \times 100\text{ mm}^3$ . Utrustningen fylls med block av bentonit och pellets med en tjocklek av ca 50 mm som simulerar den pelletsfyllda spalten mellan buffertblock och deponeringshålets vägg i SKB:s koncept för deponering av använt kärnbränsle. Vid försöket fick de olika pelletsen tillgång till vatten med olika konstanta flödes hastigheter och olika utformningar inflödet (punktflöde eller vid simulering av en vattenförande spricka).

Syftet var att avgöra om någon av de valda material och pelletstyperna lämpade sig bättre för att ta upp och fördela vatten i pelletsspalten mellan buffert och deponeringshålets vägg. Resultaten från försöken kan sammanfattas enligt följande:

- Vid utvärdering av tester där kompakterad och extruderad pellets jämförs av samma material finns det inga tydliga skillnader i fördelningen av vattnet i pelletsspalten. Dock testades endast en pelletsstorlek och en vattenkvot.
- Pelletsfyllning som utgörs av BARA-KADE sprider vattnet bättre jämfört med pelletsfyllning som utgörs av CaBen.
- Stora kanaler bildas när pelletsfyllning utgörs av CaBen, Detta verifieras av mätningarna av vattentrycken som indikerar att för CaBen så sker ingen läkning av kanalerna med medföljande snabba ökning av trycket.
- En inflödes hastighet om 0,001 l/min ger lägst spridning av vattnet i pelletsspalten. Huvudanledningen till detta är att mängden vatten som trycks in i försöket är mycket mindre än för de övriga utförda försök. Vid en inflödes hastighet om 0,1 l/min fylls vatten längs med botten av testlådan.
- Lodräta sprickor verkar ge en mer symmetrisk spridning av vattnet runt inflödet jämfört med punktinflöde.

Med beaktande av utförda försök samt tidigare gjorda försök är det inte entydigt vilken typ av pellets, extruderade eller kompakterade som är mest lämpliga som fyllning i runt bufferten. Trots detta rekommenderas följande:

1. I första hand ska samma material användas för pellets som för buffertblocken.
2. Pellets materialets kemiska innehåll, katjonsutbyteskapacitet, svälltryck och hydraulisk konduktivitet ska bestämmas på samma sätt som för övrigt buffertmaterial.
3. En avgörande faktor för val av pellets är den uppnådda fyllningens torrdensitet som påverkar den slutliga densiteten hos bufferten och därmed den långsiktiga säkerheten. Rekommendationen är att torrdensiteten för pelletsfyllningen bestäms innan ytterligare undersökningar genomförs.
4. Pelletsens mekaniska stabilitet ska bestämmas med den standardiserade metoden. Detta bör utvärderas mot typ av pellets men också mot val av vattenkvot.
5. Hur vatten tas upp av pelletsen samt tendensen till kanalbildning ska bestämmas med likande utrustning som använts här. Även detta bör utvärderas mot typ av pellets men också mot val av vattenkvot.
6. En viktig faktor vid val av pelletsmaterial är eventuell erosion av material på grund av att vatten strömmar genom pelletsfyllning. En rekommendation är att ovan föreslagna tester kompletteras med sådana undersökningar

# Abstract

This report describes laboratory experiments performed with bentonite pellets. Buffer pellets in the tests were made of BARA-KADE, a sodium-dominated bentonite originating from Wyoming, USA, and CaBen, a calcium-dominated bentonite originating from Bulgaria. Of these bentonite materials, two different types of pellets were produced: extruded and compacted.

The tests were carried out in a test box, which was partly made of plexiglass. The dimensions of the test box were  $1000 \times 1000 \times 100$  mm (L  $\times$  H  $\times$  W). The test box represents a section of the deposition hole with the annulus shaped gap between the bentonite blocks and the bedrock of the deposition hole. By filling half of the width, 50mm, with bentonite blocks and the leftover space with the pellets, it simulates the concept of SKB's disposal of spent nuclear fuel.

By introducing water at different constant flow rates, inflow patterns designs (point in flow or simulation of a water-carrying fracture) it was thought possible determine what material and pellet type was better suited to absorb and distribute water in the pellet filled annulus shaped gap between the buffer and the wall of a deposition hole. The results of the experiments can be summarized as follows:

- When evaluating tests where compacted and extruded pellets made of the same material are compared, there are no clear differences in the distribution of water in the pellet filling. However, only one pellet size and one water content were tested.
- Pellet filling of BARA-KADE spreads the water better compared to pellet filling of CaBen.
- Large channels are formed in the pellet filling made of CaBen, This was also verified by the measurements of a lower water pressure difference during the tests, which indicates that the flow of water in pellets made of CaBen was higher, as if the bentonite did not seal as well.
- An inflow rate of 0.001 l/min gives the smallest spread of water in the pellets filling. The main reason for this is that the amount of water that is introduced into the test box is much smaller than for any of the other performed tests. At an inflow rate of 0.1 l/min, water is filled from the bottom of the test box.
- Vertical fractures appear to give a more symmetrical distribution of water compared to a point inflow.

Taking into account the results from previous test it is not clear which type of pellets, extruded or compacted, are the most suitable filling of the annulus shaped outer gap in a deposition hole. However, the following is recommended:

1. The pellets should be made from the same material as the buffer blocks.
2. The chemical content of the pellet material, cation exchange capacity, swelling pressure and hydraulic conductivity shall be determined in the same way as the rest of buffer material i.e. the material used for the buffer blocks.
3. A decisive factor for selecting pellets is the obtainable dry density of the filling which affects the final density of the buffer and thus the long-term safety. The recommendation is that the dry density of the pellet filling is determined first, before further investigations are carried out.
4. The mechanical stability of the pellets shall be determined by the standardized method described in this document. This should be evaluated against the type of pellets but also against the choice of water content.
5. The tendency for duct formation and how water is absorbed by the pellets should be determined with similar equipment as used here. This should also be evaluated against the type of pellets but also against the choice of water content.
6. When selecting the pellet material; an important factor is whether there is possible erosion of material due to water flowing through pellet filling. One recommendation is that the above tests be supplemented with such studies.

# Innehåll

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>1</b>        | <b>Introduktion</b>   | 7  |
| <b>2</b>        | <b>Tidigare utförda undersökningar</b>                              | 9  |
| 2.1             | Erosion   | 9  |
| 2.2             | Vattenhållande egenskaper   | 10 |
| 2.3             | Andra kritiska processer  | 13 |
| <b>3</b>        | <b>Material</b>   | 17 |
| 3.1             | Buffertpellets  | 17 |
| 3.2             | Bentonitblock   | 18 |
| 3.3             | Kemiskt innehåll och svällande egenskaper                           | 18 |
|                 | 3.3.1 Mängden utbytbara katjoner och katjonutbyteskapacitet         | 18 |
|                 | 3.3.2 Svälltryck och hydraulisk konduktivitet                       | 19 |
| 3.4             | Försöksvatten   | 20 |
| <b>4</b>        | <b>Testutrustning</b>   | 21 |
| <b>5</b>        | <b>Genomförda försök</b>  | 23 |
| 5.1             | Begränsningar   | 24 |
| <b>6</b>        | <b>Utvärdering</b>  | 25 |
| 6.1             | Installerad pellets   | 25 |
| 6.2             | Vattenupptag  | 25 |
| 6.3             | Visuell analys av foton   | 28 |
|                 | 6.3.1 Jämförelse mellan kompakterad och extruderad pellets          | 28 |
|                 | 6.3.2 Jämförelse mellan olika material                              | 30 |
|                 | 6.3.3 Inverkan av flödes hastighet                                  | 30 |
|                 | 6.3.4 Inverkan av inflödets utformning (punktinflöde/sprickinflöde) | 31 |
| 6.4             | Uppmätta vattentryck  | 32 |
| <b>7</b>        | <b>Slutsats från utförda försök</b>                                 | 33 |
| <b>8</b>        | <b>Generella slutsatser och rekommendationer</b>                    | 35 |
|                 | <b>Referenser</b>   | 37 |
| <b>Bilaga 1</b> | Utvärdering av olika material och pelletstyper                      | 39 |
| <b>Bilaga 2</b> | Utvärdering av olika flöden   | 47 |
| <b>Bilaga 3</b> | Utvärdering av olika inflödestyper                                  | 53 |
| <b>Bilaga 4</b> | Uppmätta vattentryck vid försöken                                   | 59 |





# 1 Introduktion

Inom **KBP1018 Utformning av buffert och återfyllning** har olika bentonitmaterial samt pellets-typer testats för att finna ett material och en pelletstyp som är optimerad för buffertens pelletsspalt. I bufferten spelar pelletsen en viktig roll genom att ta upp och distribuera vatten till de pressade buffertblock som omger kopparkapseln. Önskvärda beteenden och egenskaper hos buffertpellets är:

1. Låg/förutsägbar erosion.
2. Jämnt fördelat vattenupptag.
3. Skydda buffertblocken från inflödande vatten.
4. Lägre vattenkvot än buffertblock.
5. Hållfasta vid hantering och installation (liten förekomst av finmaterial).
6. Förutsägbart beteende överlag.

Förutom uppräknade önskvärda beteende ska pelletsen också bidra till den totala mängden installerad bentonit i ett deponeringshåll.

Punkt 1 (erosion) har tidigare utvärderats och testats i ett stort antal försöksserier inom ett flertal tidigare projekt. En befintlig erosionsmodell finns tillgänglig (Sandén et al. 2008, Sandén och Börjesson 2010) och mätning av erosion kommer därmed inte utföras i detta projekt. Punkt 4 är en förutsättning som styrs vid tillverkning av pellets och som kan påverka dess egenskaper t ex förmåga att ta upp och distribuera inkommande vatten men även dess mekaniska egenskaper, se kapitel 3.1.

Punkt 6 syftar främst till att utvärdera förekomst av oförutsägbara kritiska processer såsom kraftig erosion, gel extrusion, bildning av vattenfickor, tryckuppbyggnad, piping mm. För bakgrund och inläsning kring kritiska processer som kan uppkomma hänvisas till avsnitt 3 i Börgesson et al. (2015).

För att kunna avgöra vilket bentonitmaterial och vilken pelletstyp som lämpar sig bäst att ta upp och distribuera/fördela vatten i pelletsspalten mellan buffert och deponeringshålets vägg samt att om möjligt se i vilken grad olika vatteninflöde kan vara begränsande för en fullskalig installation utfördes ett antal tester. Testerna utfördes i laboratoriemiljö där möjliga vatteninflöden i buffertens pelletsfyllda spalt efterliknades. Testutrustningen utgjordes av testlådor försedda med transparent plexiglas ( $1 \times 1 \times 0,1$  m). Lådorna fylldes med ett 5 cm tjockt lager pressade bentonitblock samt ett 5 cm tjockt lager med pellets. Pelletsen fick tillgång till ett konstant vattenflöde genom ett inflödeshåll placerat mitt på den ena plexiglasskivan. Referensuppställningen för försöken var följande; ett punktinflöde med ett vatteninflöde 0,01 l/min och kompakterad Wyoming bentonit (BARA-KADE). Testmatrisen utgick sedan från variation av vatteninflöde, punkt respektive sprickinflöde samt material och pelletstyp. Förutom Wyoming bentonit testades bulgarisk bentonit (CaBen) för buffertpellets. Blocken i försöken utgjordes av Wyoming bentonit (BARA-KADE). Plexiglassidan med pelletsfyllning foto dokumenterades löpande för att se hur vattnet distribuerades i pelletsspalten. Bentonitmaterialens vattenkvot och densitet bestämdes före installation och efter brytning av testerna. I denna rapport presenteras resultatet av testerna vilket inkluderar utvärdering av foton och analysresultat från vattenkvot och densitetsbestämningar från vatteninflödesförsök i pelletsspalt samt utvärdering av uppmätta vattentryck på inflödande vatten i försöken.

I samband med att pellets installeras i deponeringshåll och deponeringstunnlar kommer den att hanteras på olika sätt (punkt 5). Hantering kan påverka pelletsen så det bildas finmaterial. Detta kan i sin tur leda till problem med dammbildning samt att pelletfyllningens egenskaper förändras på grund av att mängden finmaterial ökar. Detta kan t ex medföra att vattenhållningsförmågan för pelletfyllningen i den initiala fasen förändras. För att ta redan på hur pellets påverkas av hantering och uppkomst av finmaterial genomfördes ett antal försök där den mekaniska hållfastheten hos de enskilda pelletarna bestämdes. Resultaten från dessa försök presenteras i kapitel 3.1.



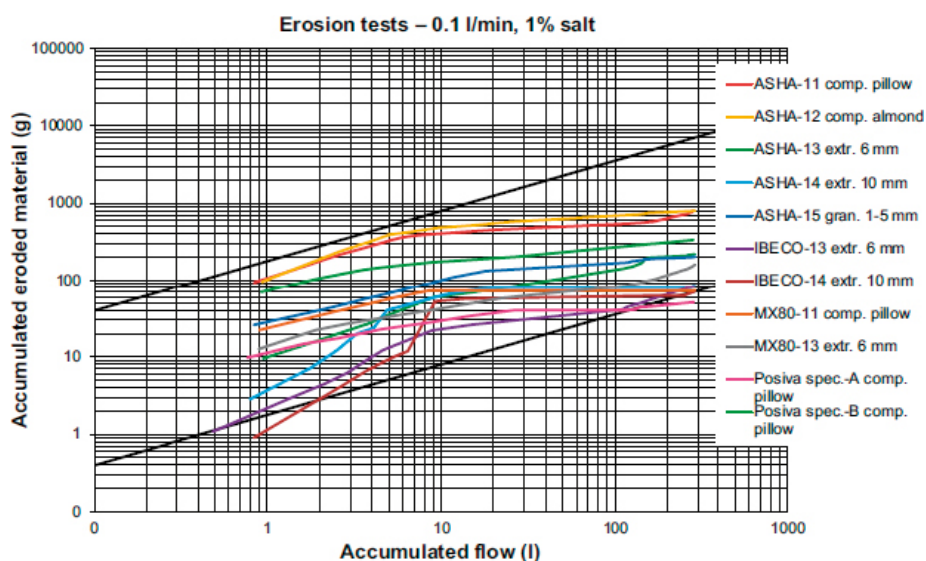
## 2 Tidigare utförda undersökningar

### 2.1 Erosion

I Andersson och Sandén (2012) presenteras slutsatser från erosionsförsök med olika material- och pelletstyper. Syftet med försöken var att undersöka förmågan hos de olika pelletstyperna att motstå verkan av strömmande vatten det vill säga deras erosionsbenägenhet. De olika materialtyperna som undersöktes kom från Indien (ASHA), Grekland (IBECO) samt Wyoming, USA (MX-80) med benämningarna Posiva Spec A och B, se tabell 2-1. Pelletstyperna som testades var framställda genom både extrudering och kompaktering och gjordes i olika storlekar och former, se tabell 2-1. De olika material- och pelletstyperna jämfördes och effekten av variationer i salthalt och flödes hastighet studerades. Vidare användes en modell som beskriver hur bentoniten i en pelletsfyllning eroderar. Denna modell togs ursprungligen fram i Sandén et al. (2008) och beskriver både erosion i pelletsfyllningar och av block. Modellen förutsätter att den ackumulerade mängden eroderat material kan beskrivas som en rät linje i ett log-log-diagram, se figur 2-1. De heldragna linjerna i figuren visar den övre och nedre begränsningarna i modellen. Den föreslagna modellen medför att erosionen kan beskrivas som avtagande med tiden. Begränsningslinjerna i modellen antyder också att spridningen i mängden eroderat material kan vara stor. I figur 2-1 visas resultaten från de utförda försöken tillsammans med modellens begränsningslinjer.

**Tabell 2-1. Testmatris för erosionsförsök med pelletsfyllning (Andersson och Sandén 2012, s 20). De med x markerade försöken är de som genomförts.**

| Pellet type      | Pellet name (material) | 1 % salinity |           |         | 3.5 % salinity |
|------------------|------------------------|--------------|-----------|---------|----------------|
|                  |                        | 0.01 l/min   | 0.1 l/min | 1 l/min | 1 l/min        |
| Compacted pillow | ASHA-11                |              | X         |         |                |
| Compacted almond | ASHA-12                |              | X         |         |                |
| Extruded 6 mm    | ASHA-13                | X            | X         | X       | X              |
| Extruded 10 mm   | ASHA-14                |              | X         |         |                |
| Granules 1–5 mm  | ASHA-15                |              | X         |         |                |
| Extruded 6 mm    | IBECO-13               | X            | X         | X       | X              |
| Extruded 10 mm   | IBECO-14               |              | X         |         |                |
| Compacted pillow | MX-80-11               |              | X         |         |                |
| Extruded 6 mm    | MX-80-13               | X            | X         | X       | X              |
| Compacted pillow | Posiva spec.A          |              | X         |         |                |
| Compacted pillow | Posiva spec.B          |              | X         |         |                |



**Figur 2-1.** Modellen som används för att beskriva erosion i en pelletsfyllning (de heldragna linjerna) tillsammans med data från utförda försök (Andersson och Sandén 2012, s 21).

För de genomförda erosionsförsöken presenteras följande slutsatser i Andersson och Sandén (2012) gällande de olika pelletstypernas motstånd mot erosion:

- Extruderade pellets av ASHA visade lägre erosion än kompakterade pellets av samma material medan det omvända gällde för MX80.
- Extruderad 10 mm pellets verkar något bättre än extruderad 6 mm pellets.
- IBECO var det material som överlag uppvisade lägst erosion.
- MX-80 var det enda material som var klart känslig mot förändringar i vattnets salthalt.
- Ingen signifikant påverkan observerades i någon materialtyp från variationer i vattenflödes hastighet.

Den viktigaste slutsatsen som kan dras från erosionsförsöken är enligt Andersson och Sandén (2012) att extruderad IBECO-pellets är mest motståndskraftig mot erosion. Dock nämns att nästan alla pelletstyperna är inom gränserna för den teoretiska modellen som beskriver erosionshastigheten (Sandén et al. 2010).

## 2.2 Vattenhållande egenskaper

I Andersson och Sandén (2012) har olika pelletstyperns förmåga att hålla och distribuera vatten studerats. Undersökningen är fokuserad på de egenskaper som önskas för pelletsfyllningar i kombination med kompakterade block för återfyllning av deponeringstunnlar och då främst pelletsfyllningens förmåga att hålla vatten. Försöken är genomförda i plexiglastuber där pelletsen får tillgång till vatten under konstant flöde från en slang mitt på plexiglastuben, se figur 2-2. Sedan studeras hur vattnet sprider sig i fyllningen samtidigt som vattentrycket som behövs för att upprätthålla det konstanta flödet registreras. Olika kombinationer av material, pellettyp, vattenflöden samt salthalt på använt vatten har studerats, se tabell 2-2.

**Tabell 2-2. Testmatris för studerande av pelletsfyllningars vattenhållande förmåga (Andersson och Sandén 2012, s 28). De med x markerade försöken är de som genomförts.**

| Pellet type  | Pellet name (material) | 1 % salinity |           |           |            |         | 3.5 % salinity |           |
|--------------|------------------------|--------------|-----------|-----------|------------|---------|----------------|-----------|
|              |                        | 0.01 l/min   | 0.1 l/min | 0.5 l/min | 0.75 l/min | 1 l/min | 0.01 l/min     | 0.1 l/min |
| Comp. pillow | ASHA-11                |              | X         |           |            |         |                | X         |
| Comp. almond | ASHA-12                |              | X         |           |            |         |                |           |
| Extr. 6 mm   | ASHA-13                | X            | X         | X         | X          | X       | X              | X         |
| Extr. 10 mm  | ASHA-14                |              | X         |           |            |         |                |           |
| Gran. 1–5 mm | ASHA-15                |              | X         |           |            |         |                |           |
| Extr. 6 mm   | IBECO-13               | X            | X         | X         | X          | X       | X              | X         |
| Extr. 10 mm  | IBECO-14               |              | X         |           |            |         |                |           |
| Comp. pillow | MX-80-11               |              | X         |           |            |         |                | X         |
| Extr. 6 mm   | MX-80-13               | X            | X         |           |            |         | X              | X         |

Generella slutsatser från de utförda försöken (Andersson och Sandén 2012) gällande förmågan att buffra vatten är:

- De extruderade pelletsen tycks vara bättre än kompakterade.
- IBECO och ASHA är bättre än MX-80.
- IBECO är minst känslig för vattnets saltinnehåll.
- Minst känslig för variation i flödes hastighet tycks IBECO och ASHA vara.

I Åberg (2009) har försök utförts där en spalt fylld med pellets har fått tillgång till vatten och vattenupptaget i pelletsen har studerats. Försöken gjordes i en cylinder med samma diameter som ett deponeringshål (1,75 m) och med en höjd av ca 1 m. Cylindern var gjord av plexiglas. Spalten hade en bredd på ca 5 cm och försök genomfördes både med och utan bentonitblock i mitten, se figur 2-3. Vatten trycktes in i pelletsfyllningen med en pump i en punkt på cylindern. Detta gjordes under kontinuerlig mätning av tryck och flöde. Totalt utfördes 6 försök med pellets av Cebogel (extruderade) och av MX80 (kompakterade), se tabell 2-3.



**Figur 2-2.** Försöksuppläggning som användes för att studera pelletsfyllningars förmåga att hålla och distribuera vatten (Andersson och Sandén 2012, s 28).

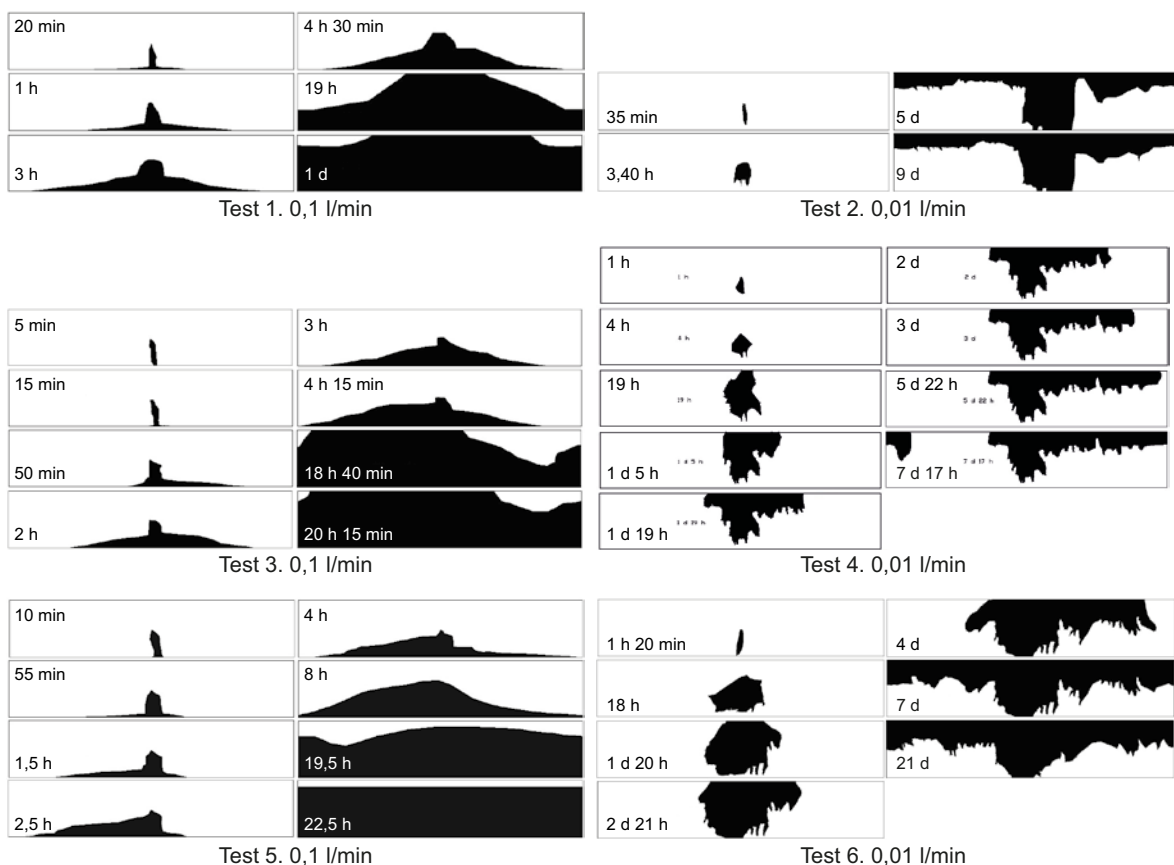
**Tabell 2-3.** Testmatris för studerande av pelletsfyllningars vattenhållande förmåga (Åberg 2009, s 15).

| Test # | Inflow (l/min) | Time (days) | Description                          |
|--------|----------------|-------------|--------------------------------------|
| 1      | 0.1            | 1           | Cebogel-bentonite and inner cylinder |
| 2      | 0.01           | 9           | Cebogel-bentonite and inner cylinder |
| 3      | 0.1            | 7           | MX-80-bentonite and inner cylinder   |
| 4      | 0.01           | 15          | MX-80-bentonite and inner cylinder   |
| 5      | 0.1            | 6           | MX-80-bentonite and rings            |
| 6      | 0.01           | 21          | MX-80-bentonite and rings            |



**Figur 2-3.** Uppställning för att studera hur vatten fördelar sig i en pelletsfylld spalt. Försöken är genomförda i en utrustning som simulerar ett fullskaligt deponeringshål (rätt diameter) (Åberg 2009, s 12–13).

Under försökens gång fotograferades utbredningen av vattnet i pelletfyllningen, se figur 2-4. Av figuren framgår att pelletstypen inte hade någon tydlig inverkan på vattenupptaget, jämför försök 1, 3 och 5, medan flödet påverkade vattenupptaget i betydande grad. Det bör dock observeras att undersökningens upplägg inte ger stöd för vilken typ av pellets som är mest fördelaktig extruderade eller kompakterade eftersom de två pelletstyperna är tillverkade av två olika material, Cebogel respektive MX-80.

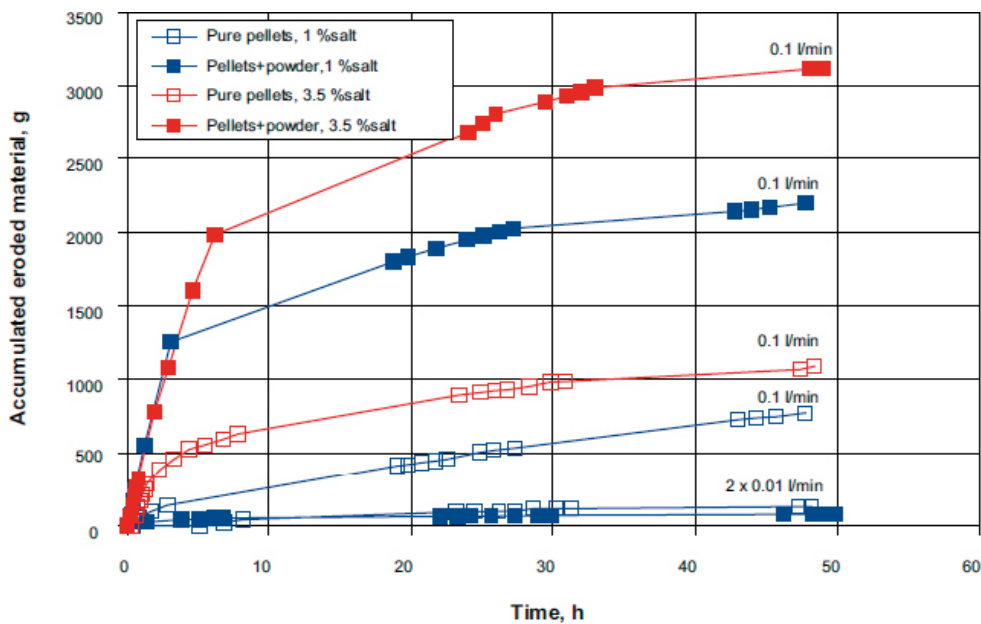


**Figur 2-4.** Schematisk bild över vattenutbredningen i en pelletsfylld spalt (Åberg 2009, s 17, 19–20, 22, 26, 31).

## 2.3 Andra kritiska processer

En viktig parameter som visade sig påverka erosionen var mängden finmaterial i pelletsfyllningen. Utförda försök med pellets av MX80 med eller utan finmaterial beskrivs i Sandén et al. (2008). Försöken genomfördes på samma sätt som beskrivs i kapitel 2.1 med olika flöden och vattentyp. Resultaten är redovisade i figur 2-5. Av figuren framgår att erosionen blir mycket större i början av de försök där pelletsen var uppblandad med fint material. Efter en viss tid så blir inverkan av finmaterialet begränsat.

Det finns en risk att pelletsen i den yttre spalten mellan berg och buffertblock, när den får tillgång till vatten, får blocken att röra sig uppåt. Detta fenomen har undersökts i Sandén och Börgesson (2010). I undersökningen genomfördes försök i den utrustning som visas i figur 2-6. Den pelletsfyllda spalten i utrustningen fick tillgång till vatten från en slang nära botten av utrustningen och den vertikala hävningen av buffertblocken mättes kontinuerligt, se figur 2-6. Resultaten från dessa mätningar redovisas i figur 2-7. Tolkningen av de utförda försöken är att när den pelletsfyllda spalten får tillgång till vatten så ökar den relativa fuktigheten i luften i uppställningen. Blocken tar upp vatten från den omgivande luften och börjar spricka vilket medför att blockens volym ökar varför en svällning av blockstapelns observeras. Av figuren framgår det att försöket med extruderade pellets (Cebogel) uppvisade större deformationer än försöken genomförda med kompakterade pellets (MX80). Det bör påpekas att eftersom försöken är gjorda med olika material som även har olika initial vattenkvot så kan man inte utesluta att skillnaden i hävning kan bero på typ av material och/eller initial vattenkvot snarare än på typ av pellets. Om emellertid tolkningen av uppkomsten av att sprickor i blocken beror på vattenupptag från omgivande luft har initiala vattenkvoten på pelletsen en underordnad roll. Figur 2-7 visar också att hävningen av buffertblocken blir betydligt mindre när en vertikal last läggs på blocken.

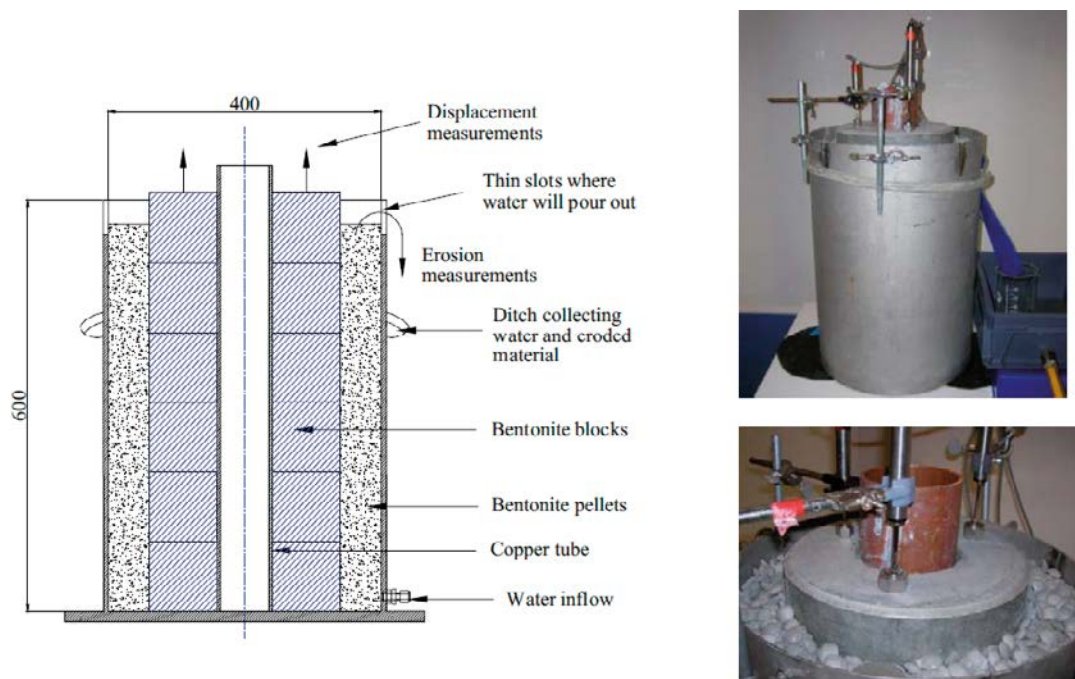


**Figur 2-5.** Resultat från erosionsförsök i fyllningar av olika typer av pellets med eller utan innehåll av fint material (Sandén et al. 2008, s 24).

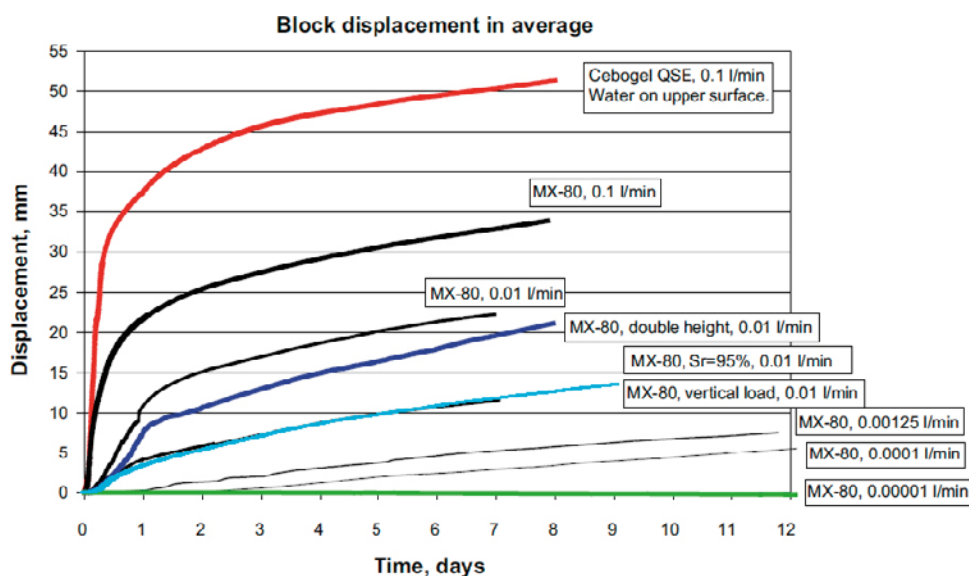


Ytterligare försök i samma utrustning har gjorts i Johannesson och Jensen (2012), se figur 2-8. Dessa försök är gjorda med både extruderade och kompakterade pellets av MX80. Försöken indikerar att hävningen blir större med extruderade pellets.

Att den vertikala hävningen påverkas av den vertikala lasten på blocken konfirmeras också av de studier av fenomenet som gjorts i Åberg (2009).

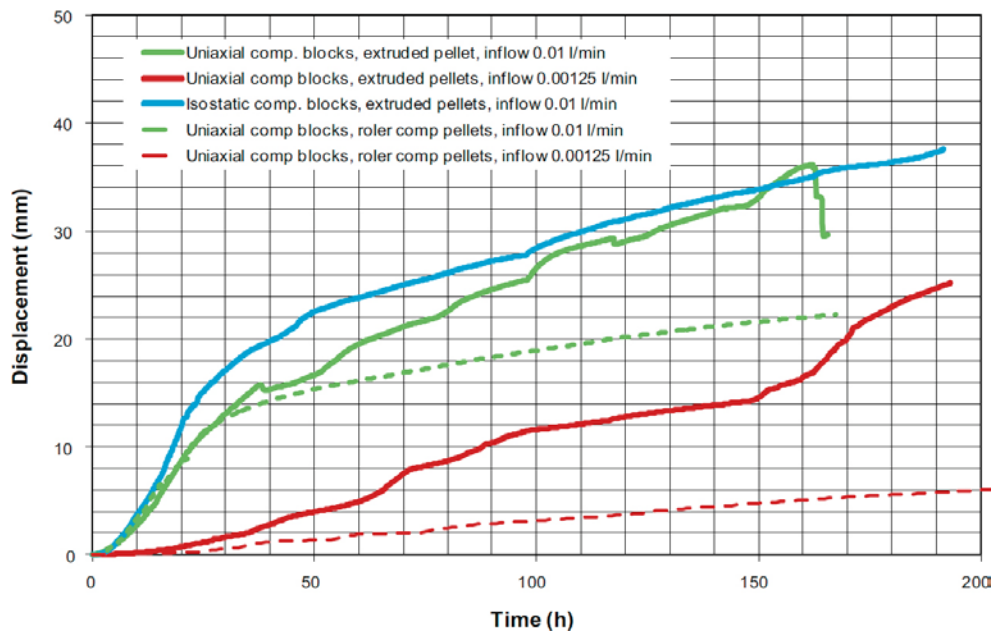


**Figur 2-6.** Testuppställning för att studera hävningen av buffert när pellets får tillgång till vatte (Sandén och Börjesson 2010, s 40).



**Figur 2-7.** Resultat av hävningen av buffert när pellets får tillgång till vatten (Sandén och Börjesson 2010, s 41).





**Figur 2-8.** Resultat av hävningen av buffert när pellets får tillgång till vatten (Johannesson och Jensen 2012, s 14).



## 3 Material

### 3.1 Buffertpellets

Buffertpellets i testerna utgjordes dels av BARA-KADE, en natriumdominerad bentonit med ursprung från Wyoming, USA, samt CaBen, en kalciumdominerad bentonit med ursprung från Bulgarien. Utav dessa bentonitmaterial tillverkades två olika pelletstyper:

- 1. Roller compacted pellet** (kompakterad). Bentoniten kompakteras mellan två hjul som roterar i motsatt riktning. På hjulen finns matchande fördjupningar som bestämmer formen på de färdiga pelletarna. Typiska former som använts är kuddformiga eller mandelformiga pellets. I dessa försök användes kuddformig pellets med en dimension om 15,8 mm × 15 mm × 7 mm tillverkade av SAHUT-CONREUR SA Frankrike. För kompakterad pellets av BARA-KADE bestämdes vattenkvoten initialt till ca 12 % och för CaBen ca 17–18 %.
- 2. Extruderad pellets.** Bentoniten pressas genom en hålmatis vilken ger pellets formade som stavar med olika längd. Diametern på stavarana kan varieras t ex 6 eller 10 mm.

Pellets av denna typ tillverkades i en utrustning som finns på Äspölaboratoriet och för dessa tester extruderades stavar med en diameter om ca 6 mm och en längd om ca 20 mm. Pellets som tillverkas genom extrusion kräver att råmaterialet har ett ganska högt vatteninnehåll vilket medför att råmaterialet innan tillverkning eventuellt behöver fuktas upp i en blandare. I dessa tester extruderades oblandat bentonitmaterial. För extruderad pellets av BARA-KADE bestämdes vattenkvoten initialt till ca 11 % och för CaBen ca 19–20 %.

Den mekaniska hållfastheten hos pelletsen bestämdes enligt metod beskriven i Sandén (2018). Bestämningarna utfördes vid Äspölaboratoriet och presenteras i tabell 3-1. Den mekaniska hållfastheten hos pellets anges som ett index i procent, DU (DUrability-index). DU-index beräknas enligt följande:

$$DU = \frac{m_{\text{efter}}}{m_{\text{före}}} \times 100$$

där

DU = mekaniska hållfastheten (%)

$m_{\text{efter}}$  = massan hos den siktade pelletsen efter tumling (g)

$m_{\text{före}}$  = massan hos den siktade pelletsen före tumling (g)

Resultaten visar att hållfastheten för pelletsen av BARA-KADE, både kompakterade och extruderade, är lägre än för övriga undersökta material. Det finns ännu inga undersökningar som indikerar vilken minsta mekaniska hållfasthet som är acceptabel för pellets som ska användas i deponeringshål.

**Tabell 3-1. Mekanisk hållfasthet hos kompakterad och extruderad pellets av MX80, BARA-KADE och CaBen.**

| Material            | Pelletstyp  | Mekanisk hållfasthet, DU-index (%) | Antal bestämningar (n) |
|---------------------|-------------|------------------------------------|------------------------|
| MX80 (Wyoming)      | kompakterad | 87,3                               | n=2                    |
| BARA-KADE (Wyoming) | kompakterad | 73,6                               | n=15                   |
| BARA-KADE (Wyoming) | extruderad  | 75,5                               | n=15                   |
| CaBen (Bulgarien)   | kompakterad | 78,8                               | n=2                    |
| CaBen (Bulgarien)   | extruderad  | 83,8                               | n=2                    |

## 3.2 Bentonitblock

I samtliga tester användes kompakterade bentonitblock med dimension 122 mm × 248,5 mm × 50 mm tillverkade av Höganäs Bjuf. De kompakterade blocken tillverkades av BARA-KADE (Wyoming bentonit) med en initial vattenkvot på ca 16 % och en torrdensitet på ca 1 760 kg/m<sup>3</sup>.

## 3.3 Kemiskt innehåll och svällande egenskaper

Vid Äspölaboratoriet har bentoniter med olika ursprung karakteriserats med kemiska och geotekniska mätmetoder. BARA-KADE (Wyoming bentonit) och CaBen (bulgarisk bentonit) har ingått i denna karakterisering. Bland annat har mängden utbytbara katjoner (EC), katjonutbyteskapacitet (CEC) samt svälltryck bestämts för dessa två material och presenteras i kapitel 3.3.1 och 3.3.2.

### 3.3.1 Mängden utbytbara katjoner och katjonutbyteskapacitet

Bentonit förekommer framförallt som natrium- respektive kalciumbentonit. Skillnaden ligger i vilka katjoner som laddningskompenserar i montmorillonitflakens negativa yta. Katjonerna finns i montmorillonitens så kallade interlayer. De vanligaste katjonerna är Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> och K<sup>+</sup>. Beroende på om envärda eller tvåvärda joner dominerar får leran olika svällningsegenskaper, speciellt vid låga densiteter. En natriumbentonit kan vid fri tillgång till vatten ta upp betydligt mer vatten och svälla betydligt mer jämfört med en kalciumbentonit medan en kalciumbentonit kan ta upp mer vatten än en natriumbentonit via luften vid låg relativ fuktighet (Brindley och Brown 1980, s 203). Montmorillonit är en jonbytare, dvs dess katjoner kan snabbt bytas ut mot andra beroende på omgivande vattenkemi. Därför är valet av motjoner inte av någon långsiktig betydelse då jonerna ändå hamnar i jämvikt med omgivande grundvatten. Däremot är motjonerna av betydelse för laborativ förståelse, samt eventuellt för bentonitens egenskaper under installation och vattenmättnadsskede i ett slutförvar.

Den specifika katjonutbyteskapaciteten (CEC, cation exchange capacity) för en bentonit är ett mått på hur många utbytbara joner som finns i leran per massenhet. CEC bestäms framförallt av storleken på smektitens negativa laddning samt hur mycket smektit som finns i leran. I tabell 3-2 presenteras CEC-data för BARA-KADE och CaBen. Bestämningarna utfördes vid Äspölaboratoriet enligt metod som finns beskriven i Lundgren (2019a). Principen för metoden är att jämvikta lermineralet med koppar(II)-lösning och därefter mäta koppar(II) upptaget i leran. Eftersom hydratiserat koppar(II) har en mycket stark blå färg kan denna lätt mätas och kvantifieras spektrofotometriskt. För att möjliggöra utbytet och undvika utfällning av icke önskvärda kopparkomplex tillsätts en organisk ligand (trietylentetramin) till koppar(II)-lösningen.

Mängden utbytbara katjoner (EC, exchangeable cations) anger totalsumma av Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> och K<sup>+</sup> efter jonbyte med en icke-intressant indexkatjon t.ex. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. I tabell 3-2 presenteras EC-data för BARA-KADE och CaBen. Extraktion av katjonerna utfördes vid Äspölaboratoriet enligt metod beskriven i Lundgren (2019b). De extraherade katjonerna analyserades sedan spektrometriskt med induktivt kopplad plasma vid externt laboratorium.

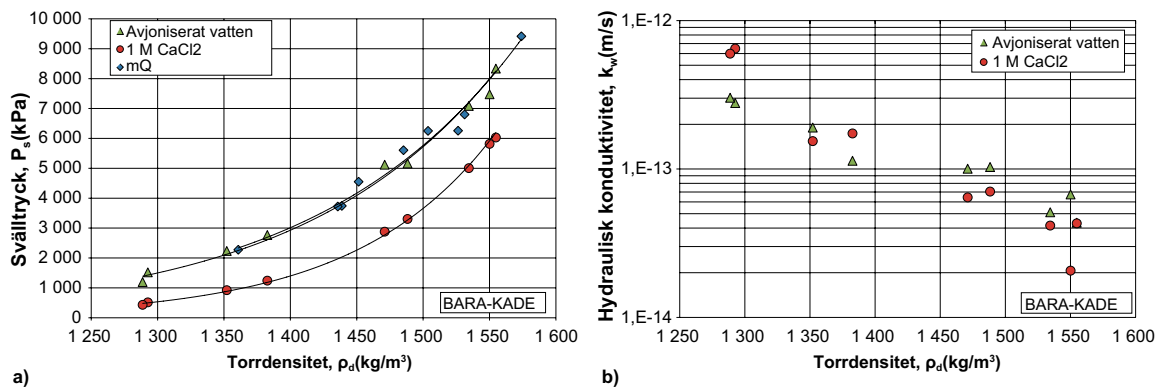
**Tabell 3-2. CEC och EC data för CaBen och BARA-KADE. CEC har analyserats för samlingsprov (CS=composite sample) och lerfraktion (CF=clay fraction). CEC/CS; n=3, CEC/CF; n=2 EC; n=2.**

| Bentonit                          | CEC mean (cmol(+)/kg) |            | Na <sup>+</sup> <sub>mean</sub> | Ca <sup>2+</sup> <sub>mean</sub> | Mg <sup>2+</sup> <sub>mean</sub> | K <sup>+</sup> <sub>mean</sub> | EC <sub>sum</sub> (cmol(+)/kg) |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                   | CS                    | CF         |                                 |                                  |                                  |                                |                                |
| CaBen 20 kg (Bulgarisk 2017)      | 73,1                  | 85,3       | 19,7                            | 49,9                             | 7,8                              | 4,4                            | 81,8                           |
| CaBen 20 ton (Bulgarisk 2018)     | 79,4                  | –          | –                               | –                                | –                                | –                              | –                              |
| BARA-KADE F 200 kg (Wyoming 2017) | 83,6                  | –          | 55,2                            | 25,9                             | 5,3                              | 1,5                            | 87,7                           |
| Analysdatum                       | 2019-05-27            | 2019-05-27 |                                 |                                  |                                  |                                | 2017-12-12                     |

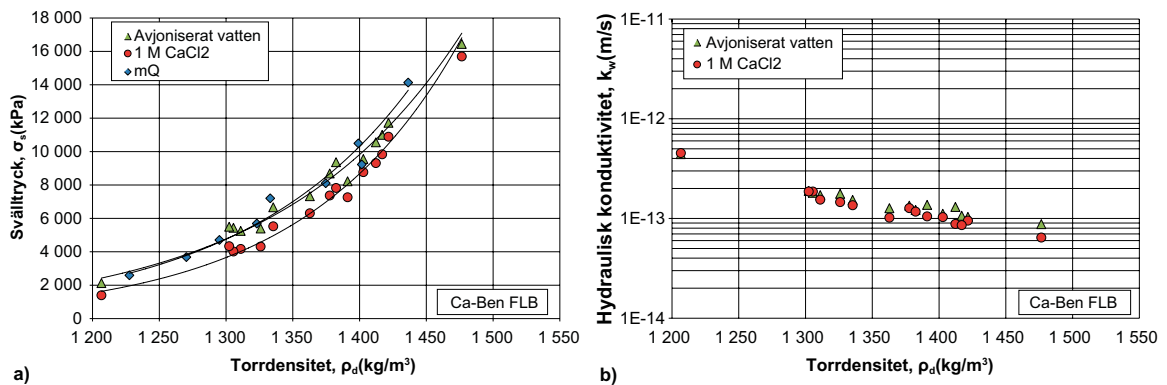
### 3.3.2 Svälltryck och hydraulisk konduktivitet

De två bentoniter som används som material i pelletsen har tidigare undersökts i ett materialprojekt (KBP1015) med avseende på svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Svälltryck och hydraulisk konduktivitet är mätt både med avjoniserat vatten och med en 1 M CaCl<sub>2</sub>-lösning. Metoderna för dessa bestämningar är beskrivna i Johannesson (2019). Resultaten från bestämningarna är redovisade i figur 3-1 respektive figur 3-2. Av figuren framgår att svälltrycket för en specifik torr densitet är betydligt högre för den bulgariska (CaBen) bentoniten jämfört med bentoniten BARA-KADE. Så är, som exempel, svälltrycket vid torr densiteten 1400 kg/m<sup>3</sup> ca 3000 kPa för BARA-KADE medan svälltrycket vid motvarande densitet för Ca-Ben är ca 10000 kPa. Skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan de två undersökta materialen är emellertid inte lika stor även om den bulgariska bentoniten har lägre hydraulisk konduktivitet än bentoniten BARA-KADE vid jämförbara torr densiteter.

Höga svälltryck brukar indikera att bentoniten har en god förmåga att ta upp vatten. Detta behöver inte betyda att en fyllning med pellets av CaBen är bättre att ta hand om vatten än en fyllning med pellets tillverkad av BARA-KADE. Faktorer som också kan påverka denna egenskap är bland annat den individuella pelletsen torr densitet, dess initiala vattenkvot samt beskaffenheten på dess ytor.



**Figur 3-1.** Svälltryck a) och Hydraulisk konduktivitet b) som funktion av torr densitet för bentoniten BARA-KADE. Notera att mQ är det samma som avjoniserat vatten innebärande två serier med avjoniserat vatten har genomförts.



**Figur 3-2.** Svälltryck a) och Hydraulisk konduktivitet b) som funktion av torr densitet för bentonit från Bulgarien (CaBen). Notera att mQ är det samma som avjoniserat vatten innebärande två serier med avjoniserat vatten har genomförts.

### 3.4 Försöksvatten

Ett syntetiskt Forsmarksvatten användes i testerna. Försöksvattnet bereddes så att sammansättningen salter representerade det som i dagsläget återfinns på förvarsdjup i Forsmark. Beredning utfördes i dosertank (1m<sup>3</sup>) där salter enligt tabell 3-3 blandades med kranvatten genom omrörning. Tanken fylldes med kranvatten så att en totalvolym om 1 000 liter erhöles. En batch försöksvatten bereddes och användes för samtliga tester. Total salthalt uppgick till ca 0,88 % i färdigt vatten.

**Tabell 3-3. Ingående salter i syntetiskt Forsmarksvatten.**

| Salt              | Koncentration (g/1 000 liter) |
|-------------------|-------------------------------|
| CaCl <sub>2</sub> | 3 790                         |
| MgCl <sub>2</sub> | 500                           |
| NaCl              | 4 620                         |

## 4 Testutrustning

I testerna användes följande utrustning:

- Testlåda 1 × 1 × 0,10 m, försedd med plexiglas (figur 4-1)
- Slang och kopplingar monterade mot testlådans inflödespunkt
- Plastfilter (PIAB) för simulering av spricka vid inflödespunkt
- Tank med försöksvatten (1 m<sup>3</sup>)
- Doserpump
- Tryckgivare inkl. datainsamlingssystem
- Go-pro kamera

I figur 4-2 visas först hur blocken tillverkade av Wyoming bentonit (BARA-KADE) installerades i utrustningen. Sista raderna block sågades med bandsåg för att anpassas till lådans dimension. Spalten mellan blocken och plexiglasskivan fylldes sedan med buffertpellets aktuell för testet, se tabell 5-1. Vid installation noterades blockens tjocklek samt totalvikten av installerade block och buffertpellets i protokoll.

Bevätningsystemet bestod av en tank med vatten samt en doserpump. Från doserpumpen leddes vatten genom en slang till inflödespunkten på testlådan. En tryckgivare installerades som en del av bevätningssystemet för att övervaka vattentrycket under försöken, se figur 4-3. En doserpump pumpade försöksvatten in i testlådan med ett konstant flöde. Det försöksvatten som användes till testerna blandades i en tank (1 m<sup>3</sup>). Sammansättningen av salter i försöksvattnet representerade det som i dagsläget återfinns på förvarsdjup i Forsmark, se tabell 3-3.



*Figur 4-1. Testlåda försedd med plexiglas.*



*Figur 4-2. Foto tagna vid installation av block (vänster) samt extruderad buffertpellets (mitten, höger) Test 3.*

I testerna simulerades tre olika typer av inflöden; punktinflöde, inflöde genom lodrät spricka samt genom vågrät spricka. Punktinflöde erhöles med ett gängat hål (rörgänga typ R1/8") där anslutning av Swagelok koppling och slang monterades, se figur 4-3. Vid simulering av en spricka monterades fyra lager med plastfilter (PIAB; 300 mm × 20 mm) vertikalt alternativt horisontellt mot inflödespunkt på plexiglasets, se figur 4-4.



*Figur 4-3. Punktinflöde för Test 3. En tryckgivare anslöts till bevätningssystemet.*



*Figur 4-4. Simulering av sprickinflöde med plastfilter.*



## 5 Genomförda försök

Innan testerna startades justerades flödet så att det överensstämde med angivet vattenflöde enligt tabell 5-1. En tryckgivare registrerade kontinuerligt trycket på inflödande vatten under testerna. Start och stopptider för testerna noterades i fältprotokoll. Testerna fotodokumenterades med GoPro kamera monterat på ett fast stativ. Samtliga översiktsbilder togs därmed med samma vinkel och avstånd för att kunna göra optimala jämförelser mellan försöken. Bildtagningsfrekvensen var 1 bild/minut med undantag av Test 8 (flöde 0,1 l/min) där frekvensen ökades till 12 bilder/minut. Detaljbilder togs även under pågående försök samt vid installation och brytning. För Test 6 blev fotodokumentation avbruten ca 5 h efter start. Därför utfördes ytterligare ett test med samma förutsättningar. Detta test fick benämningen 6B.

Totalt genomfördes tio tester, där referensuppställningen (Test 1 och 2) var ett punktinflöde, vatteninflöde 0,01 l/min och kompakterad Wyoming bentonit (BARA-KADE). Från referensuppställningen varierades sedan vattenflödet, utformning av inflödet (punkt- respektive sprickinflöde) samt material och pelletstyp. Förutom Wyoming bentonit som material i pellets testades även bulgarisk bentonit (CaBen). Blocken i försöken utgjordes av Wyoming bentonit (BARA-KADE).

**Tabell 5-1. Testmatris.**

| Test | Material buffertpellets | Pelletstyp  | Vattenflöde (l/min) | Inflödestyp     |
|------|-------------------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | punkt           |
| 2*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | punkt           |
| 3    | BARA-KADE               | extruderad  | 0,01                | punkt           |
| 4**  | CaBen                   | kompakterad | 0,01                | punkt           |
| 5**  | CaBen                   | kompakterad | 0,01                | punkt           |
| 6*** | CaBen                   | extruderad  | 0,01                | punkt           |
| 7    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,001               | punkt           |
| 8    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,1                 | punkt           |
| 9    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | spricka, lodrät |
| 10   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | spricka, vågrät |

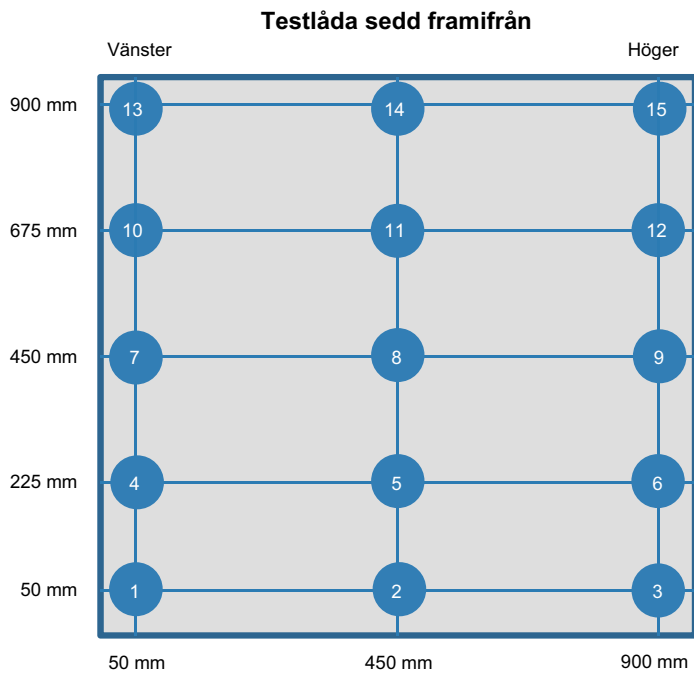
\* Referensuppställning som variationer utgick från, testet upprepades.

\*\* Avser variation på referensuppställning med alternativt material, testet upprepades.

\*\*\* För Test 6A ej fullständig fotodokumentation. Nytt test genomfördes, benämns 6B.

Testerna avbröts när vatten nått övre delen av testuppställningen och börjat strömma in i rännan monterad på utsidan av testlådan och det mätta utflödet var ungefär densamma som inflödet. När vattnet nådde upp till testlådans övre kant svällde bentoniten och föll delvis ner i rännan. Detta kan ha medfört att bevätning av pellets också har skett ovanifrån. Beslut om att avbryta pågående test togs inom ordinarie arbetstid, testerna pågick därmed olika länge efter det att vattnet nått överkant av testlådan och utflödet kunde mätas. Vid brytning av försök stoppades doserpumpen och sluttid noterades i protokoll. Testlådans ena plexiglas monterades sedan bort för provtagning av buffertpellets från testet. Totalt togs 15 prover från pelletsalten enligt positioner visade i figur 5-1.

Prov från centrumblocket ( $x=450$  mm,  $y=450$  mm) togs även ut för bestämning av densitet och vattenkvot. Vattenkvot bestämdes för prov 1–15 provtagna från pelletsalten. Dessutom togs referensprov från block och pellets. Vattenkvot och densitet bestämdes enligt metoder beskrivna i Kronberg (2019a, b). Resultat från dessa bestämningar presenteras i kapitel 6.2.



*Figur 5-1. Provtagnings-schemat visar var i pellets-palten provuttag har skett (prov 1 till 15).*

## 5.1 Begränsningar

För genomförda tester har följande begränsningar identifierats:

- Endast en pelletstorlek av varje pelletstyp har undersökts.
- Endast en vattenkvot för varje pelletstyp och bentonit har undersökts.
- Försökets volym är begränsat och det är svårt att göra några uttalanden om hur pelletsen fungerar i försöket när vattnet nått övre kanten på testlådan på grund av att pelletsen då även fått tillgång till vatten ovanifrån.
- Strukturen på de öppna kanaler som bildades under försöken har ej studerats.
- Erosion av material från försöket har ej studerats.
- Vattenupptaget av blocken i försöken har ej studerats (undantag centrumblock).
- Svällningens påverkan på blocken har ej studerats.

För Test 6 blev fotodokumentation avbruten ca 5 h efter start. Därför utfördes ytterligare ett försök med samma utformning, Test 6B. Resultat från båda testerna utvärderas i denna rapport och benämns 6A respektive 6B. För Test 9 blev fotodokumentation avbruten ca 10h efter start. Dokumentationen bedöms ändå vara tillräcklig för att testet ska kunna utvärderas.

## 6 Utvärdering

I utvärdering av försöken inkluderas/studeras följande:

- hur vatten tagits upp i pelletsfyllningen. Vattenkvoterna för prover tagna i pelletsfyllningen (prov 1–12, se figur 5-1) och centrumblock jämförs mellan försöken.
- visuell analys av tagna foton vid definierade försökstider alternativt inflödande volym vatten (bilaga 1–3).
- mätningar av uppmätta vattentryck på inflödande vatten.

### 6.1 Installerad pellets

I tabell 6-1 redovisas initiala densiteter på de i försöken installerade pelletsfyllningarna det vill säga densiteter före vattenupptag.

**Tabell 6-1 Skrymdensitet och torrdensitet för installerad pellets.**

| Test | Material buffertpellets | Pelletstyp  | Vattenflöde (l/min) | inflödestyp     | Skrymdensitet (kg/m <sup>3</sup> ) | Torrdensitet (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|-------------------------|-------------|---------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | punkt           | 1 155                              | 1 030                             |
| 2*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | punkt           | 1 149                              | 1 024                             |
| 3    | BARA-KADE               | extruderad  | 0,01                | punkt           | 1 290                              | 1 164                             |
| 4**  | CaBen                   | kompakterad | 0,01                | punkt           | 1 063                              | 888                               |
| 5**  | CaBen                   | kompakterad | 0,01                | punkt           | 1 064                              | 895                               |
| 6*** | CaBen                   | extruderad  | 0,01                | punkt           | 1 141                              | 967                               |
| 7    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,001               | punkt           | 1 186                              | 1 015                             |
| 8    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,1                 | punkt           | 1 097                              | 980                               |
| 9    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | spricka, lodrät | 1 122                              | 1 000                             |
| 10   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | spricka, vågrät | 1 121                              | 999                               |

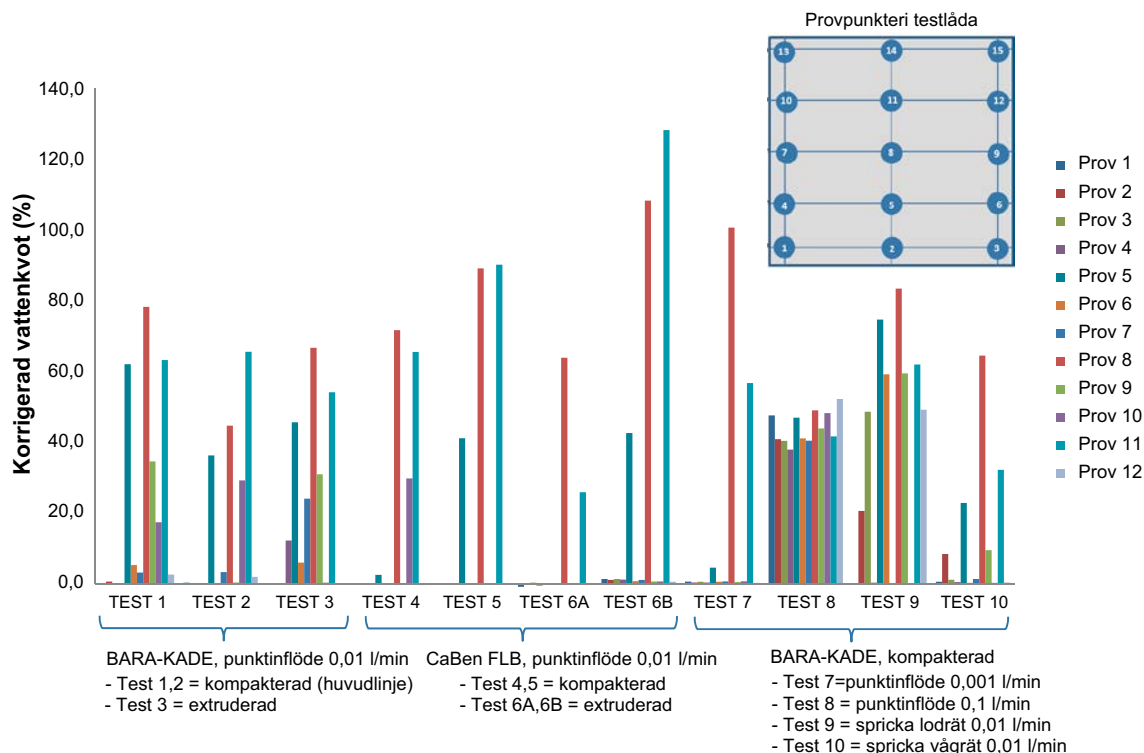
\* Referensuppställning som variationer utgick från, testet upprepades.

\*\* Avser variation på referensuppställning med alternativt material, testet upprepades.

\*\*\* För Test 6A ej fullständig fotodokumentation. Nytt test genomfördes, benämns 6B.

### 6.2 Vattenupptag

I figur 6-1 presenteras vattenupptaget för prov 1–12 tagna i pelletsfyllningen för de genomförda testerna. De data som presenteras motsvarar vattenkvoten för respektive prov korrigerat med vattenkvot för referensprovet för det aktuella materialet i testet ( $\text{vattenkvot}_{\text{prov}} - \text{vattenkvot}_{\text{referensprov}}$ ). Resultat från provtagningspunkterna 13, 14 och 15 utesluts i utvärdering då dessa prov är tagna från testlådans övre delar och bevätning har skett ovanifrån, se figur 5-1.



Figur 6-1. Vattenupptag för Test 1 till 10. Proverna är tagna i punkterna 1–12.

Diagrammet visar hur vattenupptaget skiljer sig mellan testerna. Ju fler staplar som visas för ett test desto större spridning av vattnet i pelletsalten har skett. Höjden på staplarna indikerar hur mycket vatten som pelletsen i försöken maximalt har kunnat ta upp. Vid hög inflödes hastighet, Test 8 (0,1 l/min), skedde bevätning av pelletsalten nerifrån botten av lådan och vågrätt uppåt vilket medförde jämna staplar för prov 1–12, se figur 6-1. Följande slutsatser kan dras från figur 6-1:

- Merparten av försöken (undantag Test 4 och 8) uppvisar störst vattenupptag för punkt 5, 8 och 11.
- Vid testerna med BARA-KADE (Test 1, 2 och 3) fördelar sig vattnet jämnare jämfört med testerna med CaBen (Test 4, 5, 6A och 6B).
- Vid ett lågt flöde (Test 7; 0,001 l/min) fördelar sig vattnet mer ojämnt jämfört med tester med högre flöden (Test 1 och 2; 0,01 l/min, Test 8; 0,1 l/min).
- Ett högt inflöde (Test 8) medför att bevätning sker från botten av lådan och jämt fördelat över hela testlådans bredd.
- Test som simulerar inflöde från en lodrät spricka (Test 9) fördelar vattnet jämnare jämfört med test som simulerar vågrät spricka (Test 10) och punktinflöde (Test 1 och 2).

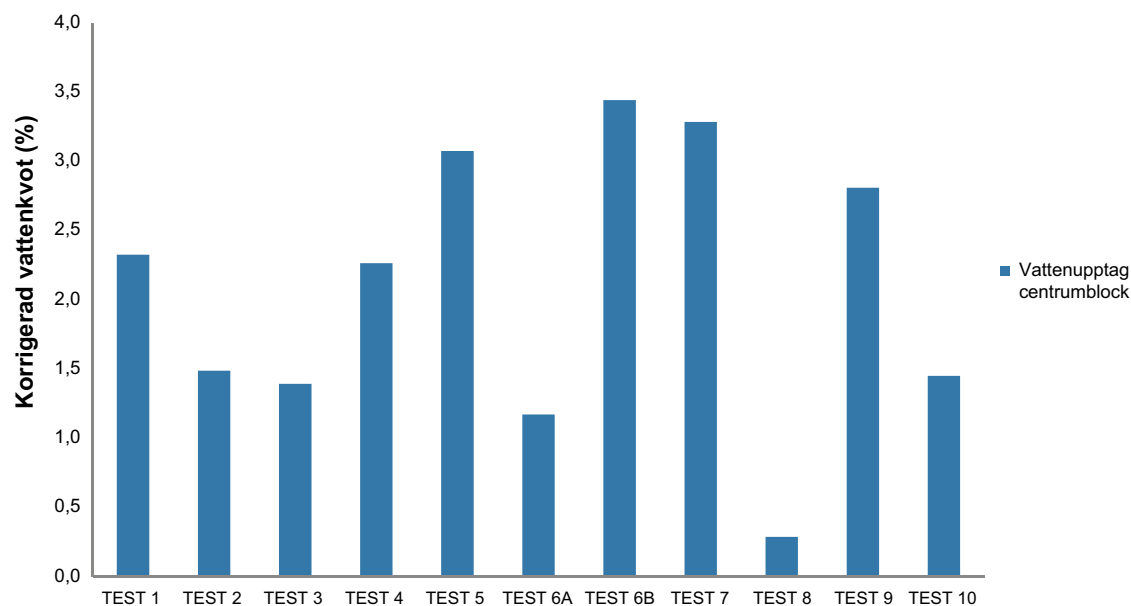
Så som beskrivits ovan blir försöken svårtolkade när vattenfronten nått överkanten på spalten. Efter den tidpunkten beväts pelletsen också från toppen. Ett ytterligare sätt att beskriva hur väl de olika pelletsfyllningarna kan ta upp vatten är att ange mängden vatten som tryckts in i spalten fram tills vattnet nått överkanten på fyllningen ( $V_{max}$ ). Dessa värden är redovisade i Tabell X\_X. Inga stora skillnader i  $V_{max}$  kunde observeras för försöken gjorda med samma flöde och med BARA-KADE (jfr Test 1, 2, 3 och 10). För försöken gjorda med CaBen observerades en skillnad mellan extruderade och kompakterade pellets. De extruderade pelletsen tog upp ca 3 ggr mer vatten innan vattenfronten nådde överkanten på pelletsfyllningen (jfr Test 4, 5 och 6B).

**Tabell 6-2** Antal liter testvatten som passerat in i spalten vid tidpunkten då vattnet nådde testlådans övre kant. Tidpunkten bestämdes utifrån visuell analys av foton.

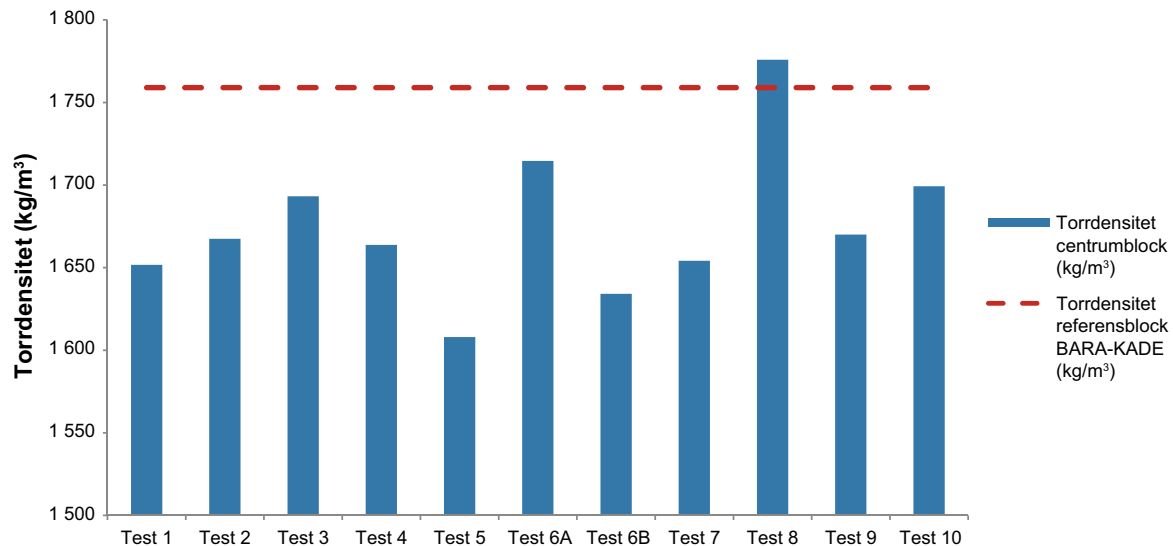
| Test | Material  | Pelletstyp | Vatteninflöde<br>(l/min) | Inflödestyp | Tiden det tar för vattnet att nå<br>testlådans övre kant<br>(hh:mm) | V <sub>max</sub><br>Antal liter vatten<br>(l) |
|------|-----------|------------|--------------------------|-------------|---|---|
| 1    | BARA-KADE | kompakt    | 0,01                     | punkt       | 9:44  | 5,84  |
| 2    | BARA-KADE | kompakt    | 0,01                     | punkt       | 14:54   | 8,94  |
| 3    | BARA-KADE | extrud     | 0,01                     | punkt       | 11:57   | 7,17  |
| 4    | CaBen FLB | kompakt    | 0,01                     | punkt       | 3:42  | 2,22  |
| 5    | CaBen FLB | kompakt    | 0,01                     | punkt       | 4:08  | 2,48  |
| 6A   | CaBen FLB | extrud     | 0,01                     | punkt       | *   | –   |
| 6B   | CaBen FLB | extrud     | 0,01                     | punkt       | 13:16   | 7,96  |
| 7    | BARA-KADE | kompakt    | 0,001                    | punkt       | 52:11   | 3,13  |
| 8    | BARA-KADE | kompakt    | 0,1                      | punkt       | 4:04  | 24,40   |
| 9    | BARA-KADE | kompakt    | 0,01                     | lodrät      | *   | –   |
| 10   | BARA-KADE | kompakt    | 0,01                     | vågrät      | 14:08   | 8,48  |

\* Ej fullständig fotodokumentation. Antal liter vatten kan inte uppskattas utifrån visuell analys av foton.

I figur 6-2 presenteras vattenupptaget för prov tagna från centrumblocken i Test 1 till 10. Centrumblocken utgjordes av Wyoming bentonit (BARA-KADE). De data som presenteras är erhållen vattenkvot för respektive centrumblock korrigerat med vattenkvot för referensblock ( $\text{vattenkvot}_{\text{centrumblock}} - \text{vattenkvot}_{\text{referensblock}}$ ). För samtliga tester är vattenupptaget i centrumblock mindre än 4 %. Detta ska jämföras med förändringen av vattenkvoten hos installerad pellets som uppgick till maximalt över 100 %, se figur 6-1. I figur 6-3 visas beräknade torrdensiteter för centrumblocken. Denna figur indikerar att blockens torrdensitet har minskat i jämförelse med installerad torrdensitet med undantag för Test 8. Detta betyder att blocken har svällt.



**Figur 6-2.** Vattenupptag för centrumblock (BARA-KADE) i Test 1 till 10.



Figur 6-3. Torrdensitet för centrumblock Test 1 till 10.

### 6.3 Visuell analys av foton

De foton som dokumenterades i testerna har studerats och förändringar i bevättningsvolym, bevättningsriktning och kanalbildning har bedömts, se bilaga 1 till 3.

För att kunna identifiera eventuell inverkan på vattenfördelningen i pelletsspalten har jämförelser gjorts mellan tester med:

- Kompakterad och extruderad pellets.
- BARA-KADE och CaBen (Wyoming respektive bulgarisk bentonit).
- Flödeshastigheter om 0,001; 0,01 samt 0,1 l/min.
- Punktinflöde, inflöde genom lodrät och vågrät spricka.

Vid bedömning av eventuell kanalbildning har denna gjorts genom att observera genom plexiglasskivan ifall synliga öppna kanaler har uppstått. I alla utförda försök, även för de där öppna kanaler observerats, har vatten tagits upp i pelletsfyllningen. Kanalbildningen har dock påverkat tiden fram tills vattnet nått begränsningarna i utrustningen (överkant av testlådan), se figur 4-4. Inga kanaler har bildats som är öppna under hela försökens gång.

#### 6.3.1 Jämförelse mellan kompakterad och extruderad pellets

För att utvärdera pelletstypens inverkan på vattenfördelningen i pelletsspalten jämfördes Test 1 och 2 med Test 3 (BARA-KADE) samt Test 4 och 5 med Test 6A och 6B (CaBen), se tabell 6-3.

Tabell 6-3 Testade material och pelletstyper.

| Test | Material  | Pelletstyp  |
|------|-----------|-------------|
| 1    | BARA-KADE | kompakterad |
| 2    | BARA-KADE | kompakterad |
| 3    | BARA-KADE | extruderad  |
| 4    | CaBen     | kompakterad |
| 5    | CaBen     | kompakterad |
| 6A   | CaBen     | extruderad  |
| 6B   | CaBen     | extruderad  |

Samtliga tester hade ett punktinflöde om 0,01 l/min. Foton tagna vid 1 h, 2h, 4h, 8h samt 16h efter försöksstart har studerats. För varje foto i tidsserien har förändringar i bevättningsvolym, bevättningsriktning samt kanalbildning bedömts, se bilaga 1. En sammanställning av bedömningen presenteras i tabell 6-4 till 6-6.

**Tabell 6-4 Bedömning av hur stor del av pelletsvolymen som är involverad i upptaget av vatten (BV). Kompakterad BARA-KADE i Test 1 utgör referenstest (BV=1). Övriga tester jämförs med Test 1 (= 1, < 1, > 1).**

| Antal timmar efter försöks-start (h) | BARA-KADE          |                    |                   | CaBen              |                    |                    |                    |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                      | Test 1 kompakterad | Test 2 kompakterad | Test 3 extruderad | Test 4 kompakterad | Test 5 kompakterad | Test 6A extruderad | Test 6B extruderad |
| 1                                    | 1                  | < 1                | 1                 | < 1                | < 1                | < 1                | < 1                |
| 2                                    | 1                  | < 1                | < 1               | < 1                | < 1                | < 1                | < 1                |
| 4                                    | 1                  | < 1                | 1                 | < 1                | < 1                | < 1                | 1                  |
| 8                                    | 1                  | < 1                | 1                 | < 1                | < 1                | –                  | < 1                |
| 16                                   | 1                  | < 1                | 1                 | < 1                | < 1                | –                  | < 1                |

**Tabell 6-5. Bedömning av bevättningsriktning. Riktningen anges som N=nedåt, U=uppåt och S=symmetrisk.**

| Antal timmar efter försöks-start (h) | BARA-KADE          |                    |                   | CaBen              |                    |                    |                    |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                      | Test 1 kompakterad | Test 2 kompakterad | Test 3 extruderad | Test 4 kompakterad | Test 5 kompakterad | Test 6A extruderad | Test 6B extruderad |
| 1                                    | N                  | N                  | N                 | S                  | S                  | N/S                | N/S                |
| 2                                    | N                  | N                  | N/S               | U/S                | U                  | U                  | U                  |
| 4                                    | U                  | U/S                | U/S               | U                  | U                  | U                  | U                  |
| 8                                    | U                  | U                  | U/S               | U                  | U/S                | –                  | N/S                |
| 16                                   | U                  | U                  | U                 | U                  | U                  | –                  | U                  |

**Tabell 6-6 Bedömning av kanalbildning. Bedöms som Ja=kanalbildning, Nej=ingen kanalbildning. Stora kanaler markeras med (+). Notera att även vid de fall där kanaler observerats så har pelletsfyllningen tagit upp vatten samt att inga kanaler som bildats har varit öppna under hela försökens gång.**

| Antal timmar efter försöks-start (h) | BARA-KADE          |                    |                   | CaBen              |                    |                    |                    |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                      | Test 1 kompakterad | Test 2 kompakterad | Test 3 extruderad | Test 4 kompakterad | Test 5 kompakterad | Test 6A extruderad | Test 6B extruderad |
| 1                                    | Nej                | Nej                | Ja                | Ja                 | Ja                 | Nej                | Ja                 |
| 2                                    | Nej                | Nej                | Ja                | Ja (+)             | Ja (+)             | Ja (+)             | Ja                 |
| 4                                    | Ja                 | Ja                 | Ja                | Ja (+)             | Ja (+)             | Ja (+)             | Ja                 |
| 8                                    | Ja                 | Ja                 | Ja                | Ja (+)             | Ja (+)             | –                  | Ja                 |
| 16                                   | Ja                 | Ja                 | Ja                | Ja                 | Ja                 | –                  | Ja                 |

Följande slutsatser kan dras från tabell 6-4 till 6-6:

- *Det finns inte någon tydlig skillnad i bevättningsvolym, bevättningsriktning och kanalbildning mellan kompakterad och extruderad pellets av samma material.*
- *Två timmar efter försöksstart med BARA-KADE (Test 1–3) kan små skillnader i bevättningsriktning noteras mellan kompakterad och extruderad pellets. I Test 3 med extruderad pellets är bevättningsriktningen något mer symmetrisk än med kompakterad pellets.*

### 6.3.2 Jämförelse mellan olika material

För att utvärdera inverkan av bentonitmaterialiet i testerna har Test 1–3 (BARA-KADE) jämförts med Test 4–6 (CaBen), se tabell 6-7.

Tabell 6-7 Testade material.

| Test | Material  |
|------|-----------|
| 1    | BARA-KADE |
| 2    | BARA-KADE |
| 3    | BARA-KADE |
| 4    | CaBen     |
| 5    | CaBen     |
| 6A   | CaBen     |
| 6B   | CaBen     |

Dessa tester hade ett punktinflöde om 0,01 l/min. Foton tagna vid 1 h, 2 h, 4 h, 8 h samt 16 h efter försöksstart har studerats. För varje foto i tidsserien har förändringar i bevättningsvolym, bevättningsriktning samt kanalbildning bedömts i en matris, se bilaga 1. Följande observationer har gjorts:

- *En timme* efter försöksstart noteras störst bevättningsvolym i tester med BARA-KADE. Bevättningsriktningen skiljer sig något mellan materialen. I tester med BARA-KADE sprider sig vattnet i en nedåtgående riktning. I tester med CaBen noteras en mer symmetrisk spridning av vattnet runt inflödet och med en nedåtgående riktning. I Test 3, 4, 5 och 6B har små kanaler bildats.
- *Två timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym i tester med BARA-KADE (Test 1). Det finns en tydlig skillnad i bevättningsriktning mellan materialen. I tester med BARA-KADE sprider sig vattnet främst i en nedåtgående riktning och i tester med CaBen sprider sig vattnet istället uppåt. I tester med CaBen (Test 4, 5 och 6) har stora kanaler bildats. I Test 6A (CaBen) är vattnet nära testlådans övre kant.
- *Fyra timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym i Test 1 och Test 3 (BARA-KADE) samt Test 6B (CaBen). I tester med BARA-KADE är bevättningsriktningen nu istället uppåtgående och något mer symmetrisk för Test 2 och 3. I samtliga tester med BARA-KADE (Test 1, 2 och 3) finns små kanaler. I tester med CaBen där stora kanaler observeras (Test 4, 5 och 6A) når vattnet lådans övre kant. I Test 6B finns små kanaler och vattnet når ännu inte lådans övre kant.
- *Åtta timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym i tester med BARA-KADE (Test 1 och Test 3). Test 6A (CaBen) går ej att utvärdera då foton saknas, se kapitel 3.3. I tester med BARA-KADE sprider sig vattnet i en uppåtgående riktning. Vattnet når ännu inte lådans övre kant men är nära i Test 1. För Test 3 noteras en något mer symmetrisk spridning av vattnet och kanalbildning är inte längre så tydlig som efter fyra timmar. I Test 4 och 5 (CaBen) där vattnet nått lådans övre kant efter fyra timmar observeras en mer symmetrisk spridning. Troligtvis beror det på att bevätning av pellets nu sker ovanifrån. I Test 6 B sprider sig vattnet nu mer symmetriskt nedåt, små kanaler observeras.
- *Sexton timmar* efter försöksstart noteras att vattnet i samtliga tester når lådans övre kant. Bevätning av pellets sker troligtvis ovanifrån varför foton tagna vid denna försökstid är svåra att utvärdera.

### 6.3.3 Inverkan av flödes hastighet

För att utvärdera inverkan av vattnets inflödes hastighet i försöken har Test 1, 2, 7 och 8 jämförts, se tabell 6-8. Dessa tester genomfördes med kompakterad pellets av BARA-KADE och med ett punktinflöde.

Tabell 6-8 Flödes hastigheter i testerna.

| Test | Flöde (l/min) |
|------|---------------|
| 1    | 0,01          |
| 2    | 0,01          |
| 7    | 0,001         |
| 8    | 0,1           |



Eftersom flödena är så olika mellan försöken, har vid utvärdering foton valts med avseende på ackumulerad mängd vatten som tryckts in i försöksuppställningen (0,6; 1,2; 2,4; 4,8 respektive 9,6 l/min). För varje foto i serien har förändringar i bevättningsvolym, bevättningsriktning samt kanalbildning bedömts, se bilaga 2. Följande observationer har gjorts:

- Vid en ackumulerad mängd vatten om *0,6 liter* observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I Test 7 sprider sig vattnet symmetriskt runt inflödet. I övriga tester (Test 1, 2 och 8) sprider sig vattnet i en nedåtgående riktning. Inga synliga kanaler i testerna.
- Samma iakttagelser görs för testerna vid *1,2 liter*. I Test 7 med den lägsta flödes hastigheten (0,001 l/min) observeras en mer symmetrisk uppåtgående riktning av vattnet. I Test 8 med högsta inflödet (0,1 l/min) sker bevätning från botten av lådan och jämt fördelat över hela testlådans bredd.
- Vid en ackumulerad mängd vatten om *2,4 liter* observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I Test 1 och 2 (flöde; 0,01 l/min) har bevättningsriktningen ändrats och vattnet sprider sig uppåt. I samtliga tester observeras kanaler. I Test 7 (flöde; 0,001 l/min) finns stora kanaler och vattnet sprider sig uppåt. Test 7 stoppas när 4,37 liter passerat in i testlåda. Vattnet når nu lådans övre kant och bevätning av pellets sker ovanifrån.
- Vid en ackumulerad mängd vatten om *4,8 liter* observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I Test 1 och 2 sprider sig vattnet i en uppåtgående riktning. I Test 1 är vattnet nära lådans övre kant. I Test 8 med högst flöde är nu ca en fjärdedel av pelletsspalten vattenfylld. Kanalbildning observeras i Test 1 och 2.
- Vid en ackumulerad mängd vatten om *9,6 liter* observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I Test 1 och 2 når vattnet lådans övre kant. I dessa tester sprider sig vattnet mer symmetriskt och beror sannolikt på att bevätning av pellets sker ovanifrån. I Test 8 (flöde; 0,1 l/min) är halva pelletsspalten vattenfylld. Kanalbildning observeras i Test 1 och 2.

#### 6.3.4 Inverkan av inflödets utformning (punktinflöde/sprickinflöde)

För att utvärdera inverkan av inflödets utformning, punktinflöde alternativt sprickinflöde (simulerat med plastfilter, lodrät respektive vågrät spricka se kapitel 3) i försöken har Test 1, 2, 9 och 10 jämförts, se tabell 6-9. Dessa tester genomfördes med ett vatteninflöde om 0,01 l/min och med kompakterad pellets av BARA-KADE.

**Tabell 6-9 Flödestyper i testerna.**

| Test | Flödestyp       |
|------|-----------------|
| 1    | Punktinflöde    |
| 2    | Punktinflöde    |
| 9    | Spricka, lodrät |
| 10   | Spricka vågrät  |

Foton tagna vid 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 10 h samt 16 h efter försöksstart har studerats. För varje foto i tids-serien har förändringar i bevättningsvolym, bevättningsriktning samt kanalbildning bedömts, se bilaga 3. Följande observationer har gjorts:

- *En timme efter* försöksstart observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I samtliga tester (punktinflöde och sprickinflöde) är bevättningsriktningen nedåtgående. I Test 9 observeras en något mer symmetrisk spridning av vattnet runt den lodräta sprickan. Inga synliga kanaler i testerna.
- *Två timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym i Test 1. I Test 9 syns en tydlig symmetrisk spridning av vattnet runt den lodräta sprickan. I övriga tester sprider sig vattnet i en nedåtgående riktning. Små kanaler har bildats i Test 9.
- *Fyra timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym i Test 1 och 10. Bevättningsriktningen har ändrats i samtliga tester och vattnet sprider sig uppåt i lådan. I Test 2, 9 och 10 sprider sig vattnet något mer symmetriskt. Små kanaler har bildats i samtliga tester.
- *Åtta timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym för Test 1. Vattnet sprider sig uppåt i Test 1 och 2 (punktinflöde). I Test 1 är vattnet nära lådans övre kant. I tester med sprickinflöde (Test 9 och 10) sprider sig vattnet mer symmetriskt uppåt. Små kanaler observeras i samtliga tester.

- *Tio timmar* efter försöksstart dokumenteras sista fotot för Test 9 (kamera slutar att fungera). Vid denna tidpunkt når vattnet ännu inte lådans övre kant. I Test 10 med vågrät sprickinflöde har stora kanaler bildats och vattnet sprider sig i en uppåtgående riktning. I test 1 (punktinflöde) når vattnet testlådans övre kant. Störst bevättningsvolym noteras för test 1.
- *Sexton timmar* efter försöksstart observeras störst bevättningsvolym för Test 10. Vattnet sprider sig i en uppåtgående riktning och i samtliga tester har det bildats kanaler. Foton vid denna försökstid är svåra att utvärdera då vattnet når lådans övre kant.

## 6.4 Uppmätta vattentryck

Vid de utförda försöken användes en pump som ställdes in med ett konstant flöde av vatten som pressades in i försöksutrustningen. Om motstånd för att pressa in vattnet uppstår kompenserar pumpen för detta genom att trycket ökar i det vatten som trycks in i pelletsalten. Detta tryck registrerades med en extern tryckgivare. Vid försöken uppstod också kanaler i pelletsfyllningen i vilka vattnet relativt lätt kunde strömma, se kapitel 6.3.1. Medan dessa kanaler förblev öppna så kan det förmodas att det registrerade trycket var lågt. Under försökens gång ”läktes” dessa kanaler för vissa av de utförda försöken ihop för att sedan öppnas igen med en förändrad riktning. När nya kanaler öppnas och stängs så är det troligt att trycket svänger upp och ner där toppar i trycken uppstår när kanalerna stängs och faller snabbt när de åter öppnas.

De uppmätta trycken för de 11 utförda försöken är redovisade i bilaga 4. Från kurvorna har det maximala uppmätta trycket noterats. Vidare har förekomsten av snabbare förändringar i trycket noterats. Dessa uppgifter redovisas i tabell 6-10 nedan. Från tabellen nedan kan följande slutsatser dras:

- Det försök som hade högst flöde, Test 8, gav lägsta trycket och inga snabba förändringar i trycket. Att inga höga tryck uppstod i detta försök bekräftas av foton som visar att vattnet vid försöket fyllde volymen av porer mellan pelletsen med vatten underifrån utan att några kanaler bildades.
- En generell trend i försöken är att pellets med bentoniten CaBen gav lägre tryck och mindre frekventa tryckpulser. Detta indikerar att för dessa försök var kanalbildningen mindre jämfört med försöken utförda med BARA-KADE alternativt att kanalerna som bildades för CaBen var så stora att de inte tenderade till att sluta sig.
- Vid jämförelser mellan kompakterade och extruderade pellets så finns det en tendens till att försöken med extruderade pellets gav högre tryck (jfr test 2 med test 3 och test 5 med test 6B). Undantaget är test 6A där trycket blev lägre än för motsvarande försök med kompakterade pellets.
- Det försök som gjordes med ett lägre inflöde, Test 7, uppvisade inga eller små avvikande beteende jämfört med motsvarande försök med lägre flöde, test 2.

**Tabell 6-10 Testmatris.**

| Test | Material buffertpellets | Pelletstyp  | Vattenflöde (l/min) | Maximala tryck (kPa) | Frekvens av toppar |
|------|-------------------------|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 1*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | 30                   | Hög                |
| 2*   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | 30                   | Hög                |
| 3    | BARA-KADE               | extruderad  | 0,01                | 70                   | Hög                |
| 4**  | CaBen FLB               | kompakterad | 0,01                | 20                   | Låg                |
| 5**  | CaBen FLB               | kompakterad | 0,01                | 21                   | Inga               |
| 6A   | CaBen FLB               | extruderad  | 0,01                | 15                   | Hög                |
| 6B   | CaBen FLB               | extruderad  | 0,01                | 40                   | Låg                |
| 7    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,001               | 32                   | Hög                |
| 8    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,1                 | 8                    | Inga               |
| 9    | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | 35                   | Hög                |
| 10   | BARA-KADE               | kompakterad | 0,01                | 27                   | Hög                |

\* Referensuppställning som variationer utgick från, testet upprepades

\*\* Avser variation på referensuppställning med alternativt material, testet upprepades

\*\*\* För test 6A ej fullständig fotodokumentation. Nytt test genomfördes, benämns 6B.

## 7 Slutsats från utförda försök

I bufferten spelar pelletsen en viktig roll genom att ta upp och distribuera vatten till de pressade buffertblock som omger kopparkapseln, se önskvärda beteenden och egenskaper hos pellets i kapitel 1. Med detta som utgångspunkt genomfördes tester med två olika bentonitmaterial, BARA-KADE och CaBen samt två olika pelletstyper, kompakterad och extruderad pellets. Syftet var att avgöra om någon av dessa material och pelletstyper lämpar sig bättre att ta upp och fördela vatten i pelletsspalten mellan buffert och deponeringshålets vägg. Testerna genomfördes med punktinflöde och inflöde genom simulerad spricka samt med olika flödes hastigheter för att om möjligt se i vilken grad dessa parametrar kan vara begränsande för en fullskalig installation. Vid utvärdering av testerna (kapitel 6) har pelletsfyllningens vattenupptag samt uppmätt vattentryck på inflödande vatten studerats. Dessutom har en visuell analys av foton vid definierade försökstider alternativt inflödande volym vatten i testerna utförts. I testerna identifierades ett antal begränsningar, se kapitel 5.1. Bland annat undersöktes endast en pelletsstorlek av varje pelletstyp. Vidare undersöktes endast en vattenkvot för varje pelletstyp och material. Nedan presenteras slutsatser från genomförda tester.

Fördelning av vatten i pelletsspalten och vattenupptaget kan påverkas av:

- *Pelletstyp*. Vid utvärdering av tester där kompakterad och extruderad pellets jämförs av samma material finns det inga tydliga skillnader för materialet BARA-KADE i fördelningen av vattnet i pelletsspalten. För materialet CaBen fördelade de extruderade pelletsen vattnet jämnare jämfört med de kompakterade. Dock testades endast en pelletsstorlek och en vattenkvot.
- *Bentonitmaterial*. Pelletsfyllning som utgörs av BARA-KADE sprider vattnet jämnare jämfört med pelletsfyllning som utgörs av CaBen, se figur 6-1. I tester med BARA-KADE är bevättningsriktningen initialt mer nedåtgående jämfört med tester där pelletsfyllning utgörs av CaBen, se tabell 6-5.
- *Kanalbildning*. Stora kanaler bildas när pelletsfyllning utgörs av CaBen, se tabell 6-6. Detta verifieras av mätningarna av vattentrycken som indikerar att för CaBen så sker ingen läkning av kanalerna med medföljande snabba ökning av trycket, se kapitel 6.4
- *Inflödes hastigheten*. En inflödes hastighet om 0,001 l/min ger lägst spridning av vattnet i pelletsspalten. Vid en inflödes hastighet om 0,1 l/min fylls vatten längs med botten av testlådan, se figur 6-1.
- *Inflödestyp*. Lodräta sprickor verkar ge en mer symmetrisk spridning av vattnet runt inflödet jämfört med punktinflöde, se figur 6-1.

Centrumblockets vattenupptag påverkas av:

- *Inflödes hastigheten*. I Test 8 pumpades testvatten in i pelletsspalten med en hastighet om 0,1 l/min. Data från vattenkvot- och densitetsbestämning visar att centrumblocket i Test 8 har ett ungefär samma vattenkvot och torrdensitet som referensblocket. Troligtvis har centrumblocket inte hunnit ta upp vatten och svälla lika mycket som i övriga tester med lägre inflödes hastigheter.



## 8 Generella slutsatser och rekommendationer

Följande generella slutsatser och rekommendationer kan dras från de utförda försöken gällande val av pellets:

- Skillnaderna mellan de i denna undersökning testade pelletstyperna är små.
- Val av material tycks vara den faktor som mest påverkar pelletsens förmåga att buffra vatten.
- Mindre avgörande tycks typ av pellets vara (kompakterade respektive extruderade).
- Det finns ingen skillnad mellan de undersökta pelletsens förmåga att förhindra vatten att nå och påverka blocken av bentonit innanför pelletsfyllningen.
- Det kan inte uteslutas att vattenkvoten hos materialen kan ha en avgörande betydelse för hur pelletsen fungerar som fyllning. Detta har inte undersökts här.
- Bara en storlek på extruderade pellets och en storlek på kompakterade pellets har använts i försöken. Detta innebär att några slutsatser gällande inverkan av pelletsens dimensioner på resultaten inte kan dras.

Generella slutsatser från tidigare gjorda undersökningar kan sammanfattas enligt följande:

- Det finns en liten och inte särskilt tydlig tendens att extruderade pellets visar något lägre erosion jämfört med kompakterade pellets. Ju större de extruderade pelletsen är desto mindre erosion kunde uppmätas. Erosionsförsöken visar att erosionen är mest beroende av bentonittyp. Erosionen tycks också påverkas av mängden fint material i fyllningen, åtminstone till en början. Efter en längre tid blir inverkan av finmaterial mindre.
- Förmågan att buffra vatten tycks vara bättre för extruderade pellets jämfört med kompakterade pellets i en undersökning, medan pellettypen inte tycks vara av betydelse i en annan undersökning. Även här tycks avgörande faktorn för förmågan att buffra vatten vara typen av bentonit. Noterbart är att undersökningarna är gjorda med olika initialt vatteninnehåll på pelletsen varför slutsatserna är osäkra.
- Det finns en tydlig tendens till att extruderade pellets ger större hävning av bufferten jämfört med en fyllning av kompakterade pellets. Effekten minskar vid en ökande vertikal last på bufferten.

Med beaktan av utförda försök i detta projekt samt tidigare gjorda försök är det inte entydigt vilken typ av pellets, extruderade eller kompakterade som är mest lämpliga som fyllning i runt bufferten. Trots detta rekommenderas följande:

1. I första hand ska samma material användas för pellets som för buffertblocken.
2. Pellets materialets kemiska innehåll, katjonsutbyteskapacitet, svälltryck och hydraulisk konduktivitet ska bestämmas.
3. En avgörande faktor för val av pellets är den uppnådda fyllningens torrdensitet som påverkar den slutliga densiteten hos bufferten och därmed den långsiktiga säkerheten. Rekommendationen är att torrdensiteten för pelletsfyllningen bestäms innan ytterligare undersökningar genomförs.
4. Pellets mekaniska stabilitet ska utvärderas med den standardiserade metoden som beskrivs här. Det utvärderade DU-indexet ska vara större än ett visst värde vilket ännu inte har bestämts.
5. Hur vatten tas upp av pelletsen samt tendensen till kanalbildning ska bestämmas med liknande utrustning som använts här. Även detta bör utvärderas mot typ av pellets men också mot val av vattenkvot. Rekommendationen är att eftersträva en så jämn vattenfördelning som möjligt kring inflödespunkten.
6. En viktig faktor vid val av pelletsmaterial är eventuell erosion av material på grund av att vatten strömmar genom pelletsfyllning. En rekommendation är att ovan föreslagna tester kompletteras med sådana undersökningar.



## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer). SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till [dokument@skb.se](mailto:dokument@skb.se).

**Andersson L, Sandén T, 2012.** Optimization of backfill pellet properties. ÅSKAR DP2. Laboratory tests. SKB R-12-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Brindley G W, Brown G, 1980.** Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification. London: Mineralogical Society. (Mineralogical Society Monograph 5)

**Börgesson L, Sandén T, Dueck A, Andersson L, Jensen V, Nilsson U, Olsson S, Åkesson M, Kristensson O, Svensson U, 2015.** Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes. EVA project. SKB TR-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Johannesson L-E, 2019.** Bestämning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet. SKBdoc 1449389 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Johannesson L-E, Jensen V, 2012.** Effects of water inflow into a deposition hole. Influence of pellets type and of buffer block manufacturing technique. Laboratory test results. SKB P-13-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Kronberg H, 2019a.** Bestämning av vattenhalt och vattenkvot i bentonitlera. SKBdoc 1419679 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Kronberg H, 2019b.** Bestämning av skrym- och torrdensitet för bentonitlera. SKBdoc 1431662 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lundgren C, 2019a.** Bestämning av katjonutbyteskapacitet (CEC) i bentonitlera med Cu-trietylenteteramin/UV-vis. SKBdoc 1417484 ver 3.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lundgren C, 2019b.** Extrahering och bestämning av utbytbara katjoner (EC) i bentonitlera. SKBdoc 1405486 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Sandén T, 2018.** Metodbeskrivning för kvalitetskontroll av bentonitpellets efter tillverkning. SKBdoc 1716109 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Sandén T, Börgesson L, 2010.** Early effects of water inflow into a deposition hole. Laboratory tests results. SKB R-10-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Sandén T, Börgesson L, Dueck A, Goudarzi R, Lönnqvist M, 2008.** Deep repository – Engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. SKB R-08-135, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Åberg A, 2009.** Effects of water inflow on the buffer – an experimental study. SKB R-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.





## Utvärdering av olika material och pelletstyper

Vid utvärdering har förändring jämfört med föregående foto i tidsserie noterats. Med undantag av bevättningsvolym som jämförts med huvudlinje (test 1 BARA-KADE).

Bevättningsvolym (area): 1, < 1, > 1 (Jämförs med test 1 BARA-KADE = 1)

Bevättningsriktning: U = uppåt N = nedåt S = symmetriskt

Kanalbildning: Ja, Nej (+ = stora kanaler)

### 1 h efter start

| Test | Material         | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|------------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | BARA-KADE komp   | 1     | N                   | Nej   | Nej           |
| 2    | BARA-KADE komp   | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |
| 3    | BARA-KADE extrud | 1     | N                   | Ja    | Nej           |
| 4    | CaBen komp       | < 1   | S                   | Ja    | Nej           |
| 5    | CaBen komp       | < 1   | S                   | Ja    | Nej           |
| 6A   | CaBen extrud     | < 1   | S/N                 | Nej   | Nej           |
| 6B   | CaBen extrud     | < 1   | S/N                 | Ja    | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning för BARA-KADE och CaBen skiljer sig något. BARA-KADE nedåt, CaBen sprider sig mer symmetriskt nedåt.

### 2 h efter start

| Test | Material         | Volym | Bevättningsriktning | Kanal  | När övre kant |
|------|------------------|-------|---------------------|--------|---------------|
| 1    | BARA-KADE komp   | 1     | N                   | Nej    | Nej           |
| 2    | BARA-KADE komp   | < 1   | N                   | Nej    | Nej           |
| 3    | BARA-KADE extrud | < 1   | N/S                 | Ja     | Nej           |
| 4    | CaBen komp       | < 1   | U/S                 | Ja (+) | Nej           |
| 5    | CaBen komp       | < 1   | U                   | Ja (+) | Nej           |
| 6A   | CaBen extrud     | < 1   | U                   | Ja (+) | Nära kanten   |
| 6B   | CaBen extrud     | < 1   | U                   | Ja     | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning för BARA-KADE och CaBen skiljer sig. BARA-KADE nedåt, CaBen sprider sig uppåt. Stora kanaler i CaBen, (undantag 6B), test 6A nära kanten.

### 4 h efter start

| Test | Material         | Volym | Bevättningsriktning | Kanal  | När övre kant |
|------|------------------|-------|---------------------|--------|---------------|
| 1    | BARA-KADE komp   | 1     | U                   | Ja     | Nej           |
| 2    | BARA-KADE komp   | < 1   | U/S                 | Ja     | Nej           |
| 3    | BARA-KADE extrud | 1     | U/S                 | Ja     | Nej           |
| 4    | CaBen komp       | < 1   | U                   | Ja (+) | Ja            |
| 5    | CaBen komp       | < 1   | U                   | Ja (+) | Ja            |
| 6A   | CaBen extrud     | < 1   | U                   | Ja (+) | Ja            |
| 6B   | CaBen extrud     | 1     | U                   | Ja     | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning för BARA-KADE ändras till uppåt/symmetriskt. CaBen uppåt med stor kanalbildning. CaBen test 4, 5 och 6A när kant. CaBen test 6B ingen stor kanalbildning, när ej kant.

### 8 h efter start

| Test | Material         | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|------------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 1    | BARA-KADE komp   | 1     | U                  | Ja     | Nära kanten   |
| 2    | BARA-KADE komp   | < 1   | U                  | Ja     | Nej           |
| 3    | BARA-KADE extrud | 1     | U/S                | Ja     | Nej           |
| 4    | CaBen komp       | < 1   | U                  | Ja (+) | Ja            |
| 5    | CaBen komp       | < 1   | U/S                | Ja (+) | Ja            |
| 6B   | CaBen extrud     | < 1   | N/S                | Ja     | Nej           |

**Kommentar:** Test 6 A ej utvärderad. Saknar foto från aktuell tid. BARA-KADE sprider sig uppåt. Extruderad BARA-KADE inte längre tydliga kanaler och börjar sprida sig mer symmetriskt. CaBen kompakterad sprider sig uppåt med stora kanaler och har nått kant. Bevätning ovanifrån ger symmetrisk spridning? CaBen extruderad test 6B inga stora kanaler och börjar sprida sig nedåt symmetriskt.

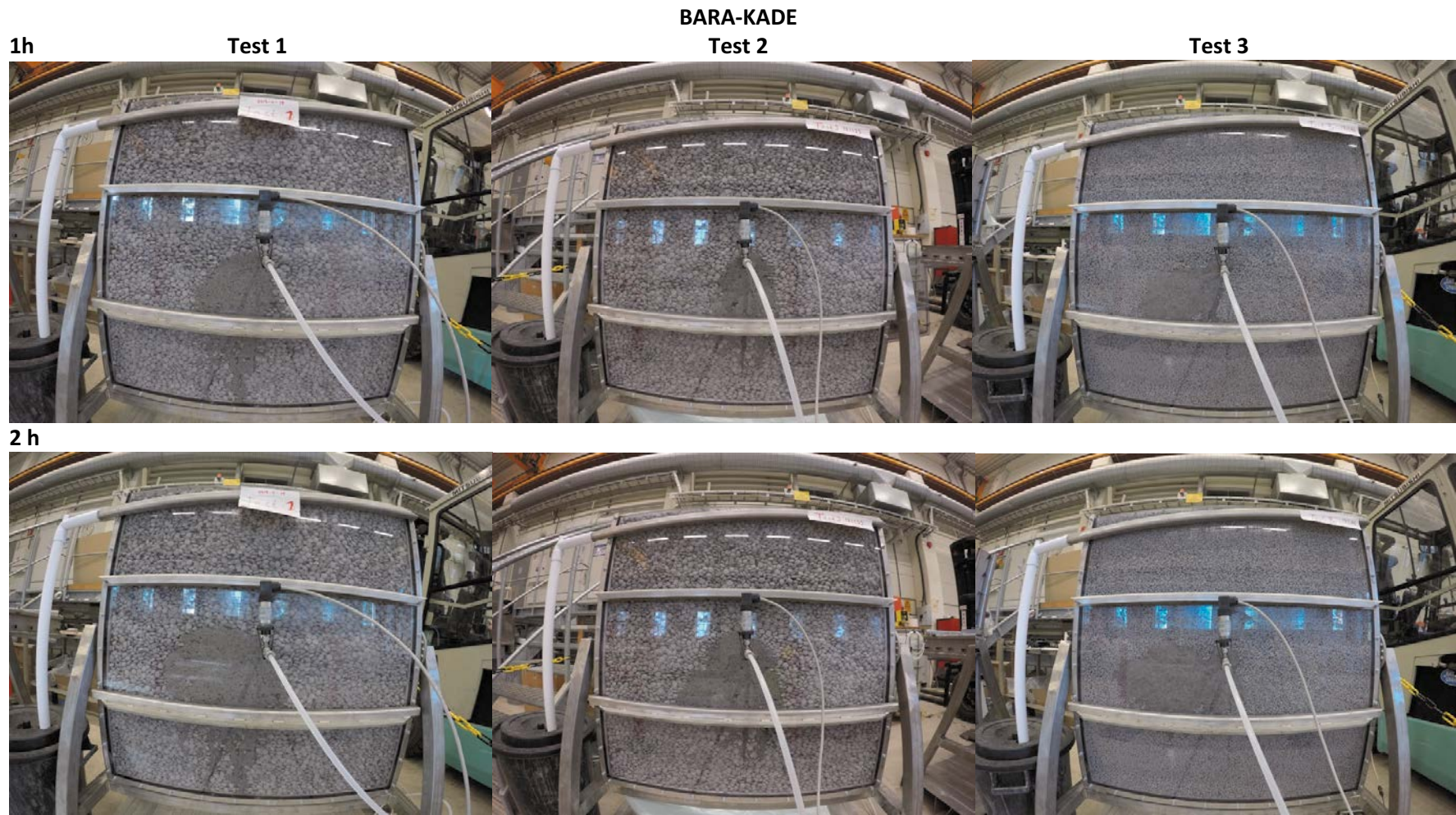
### 16 h efter start

| Test | Material         | Volym | Bevätningsriktning | Kanal | Når övre kant |
|------|------------------|-------|--------------------|-------|---------------|
| 1    | BARA-KADE komp   | 1     | U                  | Ja    | Ja            |
| 2    | BARA-KADE komp   | < 1   | U                  | Ja    | Ja            |
| 3    | BARA-KADE extrud | 1     | U                  | Ja    | Ja            |
| 4    | CaBen komp       | < 1   | U                  | Ja    | Ja            |
| 5    | CaBen komp       | < 1   | U/S                | Ja    | Ja            |
| 6B   | CaBen extrud     | < 1   | U                  | Ja    | Ja            |

**Kommentar:** Svårt att utvärdera när vatten har nått kant och bevätning ev sker ovanifrån. Stora kanaler inte lika tydliga.

### Sammanfattning:

- Efter 2 h skillnad mellan materialen
- Kanalbildning, vattnet går uppåt
- Extra stora kanaler för CaBen
- Efter 4 h går samtliga uppåt och CaBen når kanten (undantag 6B, inga stora kanaler).





**BARA-KADE  
Test 2**

**4h**

**Test**

**Test 3**

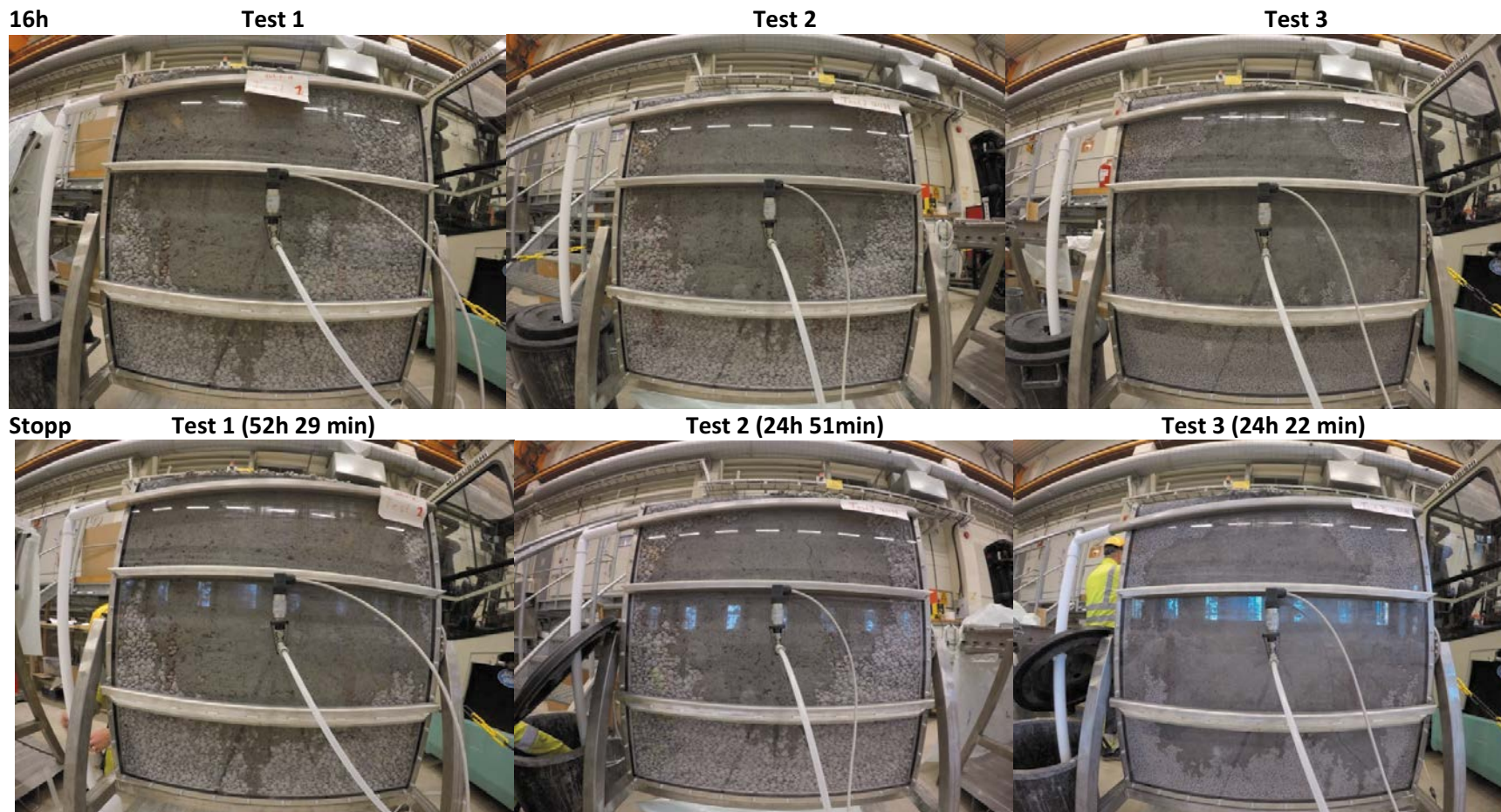


**8h**





**BARA-KADE**



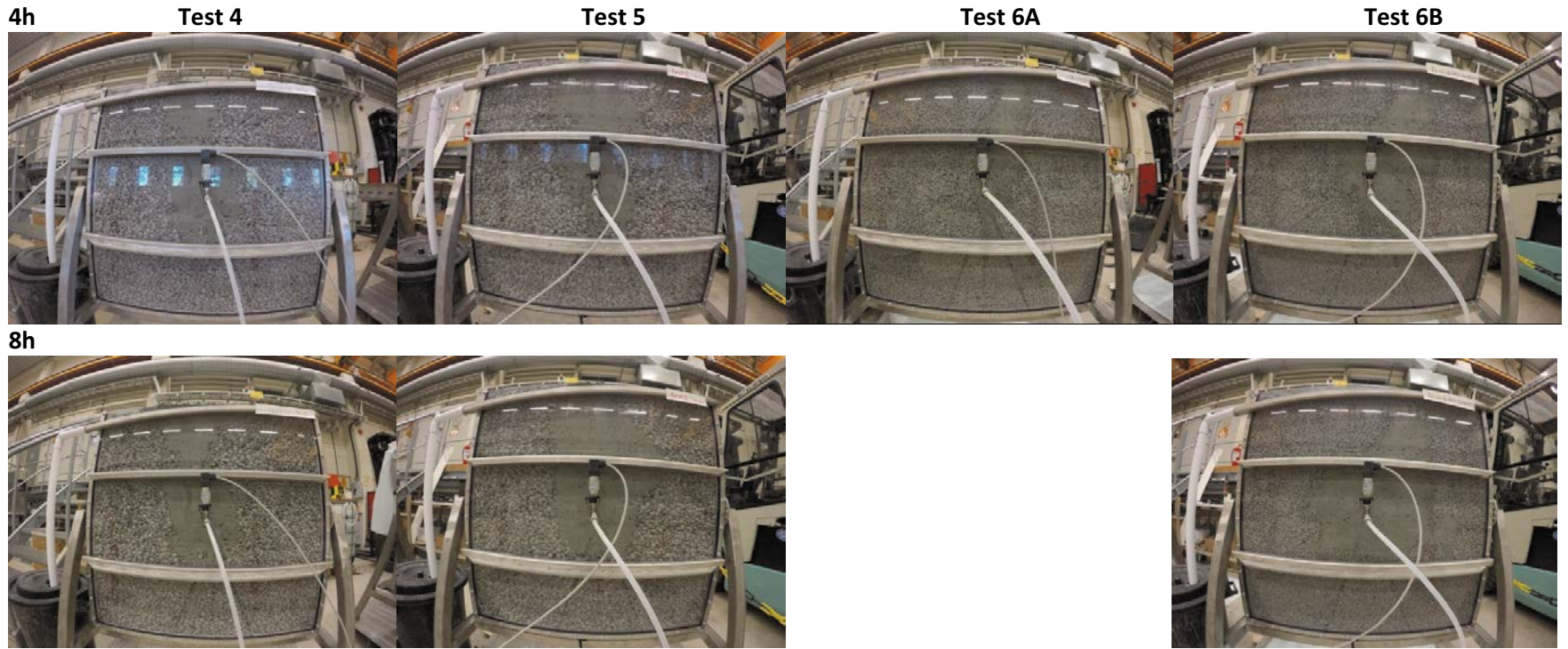
Observera att angiven stopptid inte motsvarar exakt den tidpunkt när vattnet når formens övre kant. Stopptid motsvarar den tidpunkt då pumpen stoppas.

CaBen FLB





CaBen FLB



## CaBen FLB

16h

Test 4

Test 5

Test 6B



Stopp Test 4 (26h 13min)

Test 5 (27h 8 min)

Test 6A (4h 38 min)

Test 6B (22h 53min)



Observera att angiven stopptid inte motsvarar exakt den tidpunkt när vattnet når formens övre kant. Stopptid motsvarar den tidpunkt då pumpen stoppas, med undantag test 6A där stopptiden motsvarar den tid då sista fotot togs (belysning släcktes vid kvällsrondering).



### Utvärdering av olika flöden

Vid utvärdering har förändring jämfört med föregående foto i tidsserie noterats. Med undantag av bevättningsvolym som jämförts med huvudlinje (test 1 BARA-KADE).

Bevättningsvolym (area): 1, < 1, > 1 (Jämförs med test 1 BARA-KADE = 1)

Bevättningsriktning: U = uppåt N = nedåt S = symmetriskt

Kanalbildning: Ja, Nej (+ = stora kanaler)

#### Efter 0,6 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|---------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | N                   | Nej   | Nej           |
| 2    | 0,01          | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |
| 7    | 0,001         | < 1   | S                   | Nej   | Nej           |
| 8    | 0,1           | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning skiljer sig. Lågt flöde (test 7) ger symmetrisk riktning. Övriga går nedåt.

#### Efter 1,2 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|---------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | N                   | Nej   | Nej           |
| 2    | 0,01          | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |
| 7    | 0,001         | < 1   | U/S                 | Nej   | Nej           |
| 8    | 0,1           | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning skiljer sig. Lågt flöde (test 7) går uppåt, övriga går nedåt. Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

#### Efter 2,4 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevättningsriktning | Kanal  | När övre kant |
|------|---------------|-------|---------------------|--------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | U                   | Ja     | Nej           |
| 2    | 0,01          | < 1   | U/S                 | Ja     | Nej           |
| 7    | 0,001         | < 1   | U                   | Ja (+) | Nej           |
| 8    | 0,1           | < 1   | N                   | Ja     | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning vid flöde 0,01 ändras till uppåt. Lågt flöde (test 7) går uppåt med stor kanalbildning. Högt flöde (test 8) går nedåt. Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

#### Efter 4,8 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|---------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | U                   | Ja    | Nära kanten   |
| 2    | 0,01          | < 1   | U                   | Ja    | Nej           |
| 7*   | 0,001         | < 1   | U                   | Ja    | Ja            |
| 8    | 0,1           | < 1   | N                   | Ja    | Nej           |

**Kommentar:** \* Test 7 fick stoppas efter 4,37 liter. Foto taget efter 4,37 liter är bedömt. Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

### Efter 9,6 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevätningsriktning | Kanal | Når övre kant |
|------|---------------|-------|--------------------|-------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | U/S                | Ja    | Ja            |
| 2    | 0,01          | < 1   | U/S                | Ja    | Ja            |
| 8    | 0,1           | > 1   | N                  | Ja    | Nej           |

**Kommentar:** Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

### Efter 14,9 L stopp test 2

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|---------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 1    | 0,01          | 1     | U/S                | Ja (+) | Ja            |
| 2    | 0,01          | < 1   | U/S                | Ja (+) | Ja            |
| 8    | 0,1           | > 1   | U                  | Ja (+) | Nej           |

**Kommentar:** Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

### Efter 19,2 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|---------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 8    | 0,1           |       | U                  | Ja (+) | Nej           |

**Kommentar:** Vågrät bevätning nerifrån och upp för test 8.

### Efter 28,1 L

| Test | Flöde (l/min) | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|---------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 8    | 0,1           |       | U                  | Ja (+) | Ja            |

### Sammanfattning:

- Lågt flöde och högt flöde skiljer sig i bevättningsriktning (upp respektive nedåt).
- Vid högt flöde går vattnet till botten av lådan, vågrät bevätning enda upp till kanten av lådan.
- Lågt flöde (0,001 l/min): Efter 4,37 liter visar foto att bevätning har nått kanten (ca 72 h 54 min).
- Högt flöde (0,1 l/min): Efter 28,1 liter visar foto att bevätning har nått kanten (ca 4 h 41 min).

0,6 L

Test 1

Test 2

Test 7

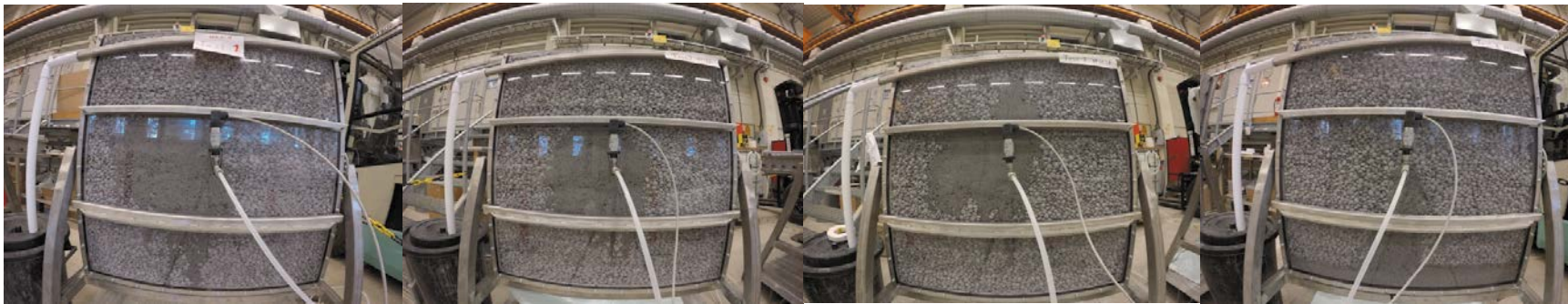
Test 8



1,2 L



2,4 L





4,8 L

Test 1

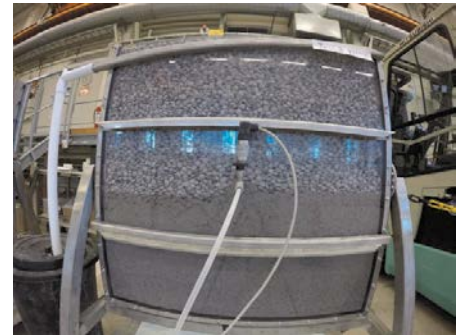
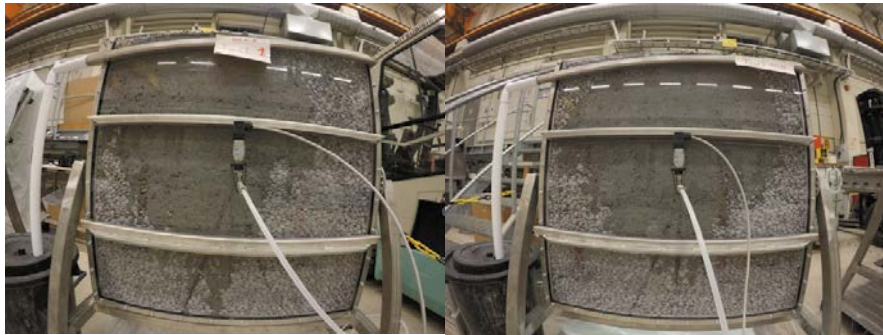
Test 2

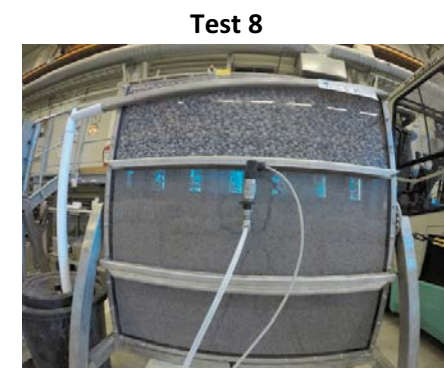
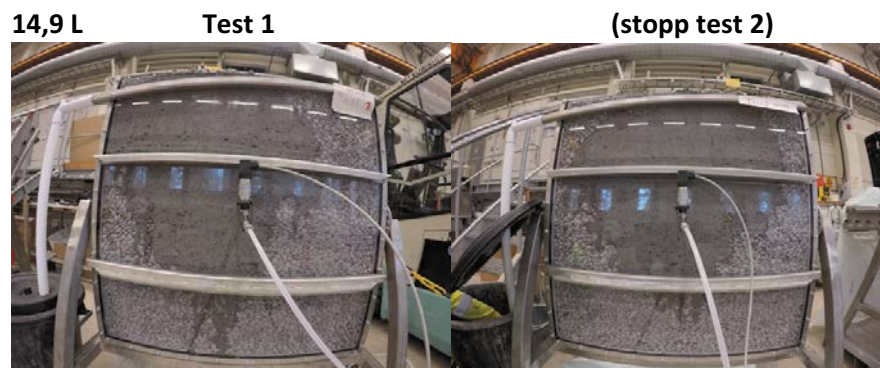
Test 7 (stopp 4,4 L)

Test 8



9,6 L





Observera att antal liter som anges ovan vid stopp inte motsvarar den mängd vatten som har gått igenom då vattnet exakt når lådans övre kant. Det motsvarar det antal liter som har gått igenom då pump stoppas och testet bryts.



## Utvärdering av olika inflödestyper

Vid utvärdering har förändring jämfört med föregående foto i tidsserie noterats. Med undantag av bevättningsvolym som jämförts med huvudlinje (Test 1 BARA-KADE).

Bevättningsvolym (area): 1, < 1, > 1 (Jämförs med Test 1 BARA-KADE = 1)

Bevättningsriktning: U = uppåt N = nedåt S = symmetriskt

Kanalbildning: Ja, Nej (+ = stora kanaler)

### 1 h efter start

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|----------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | N                   | Nej   | Nej           |
| 2    | Punkt          | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |
| 9    | Spricka lodrät | < 1   | N/S                 | Nej   | Nej           |
| 10   | Spricka vågrät | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning nedåt för samtliga. Lodrät spricka (test 9) något mer symmetriskt.

### 2 h efter start

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|----------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | N                   | Nej   | Nej           |
| 2    | Punkt          | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |
| 9    | Spricka lodrät | < 1   | S                   | Ja    | Nej           |
| 10   | Spricka vågrät | < 1   | N                   | Nej   | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning nedåt för alla utom lodrät spricka (test 9).

### 4 h efter start

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|----------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | U                   | Ja    | Nej           |
| 2    | Punkt          | < 1   | U/S                 | Ja    | Nej           |
| 9    | Spricka lodrät | < 1   | U/S                 | Ja    | Nej           |
| 10   | Spricka vågrät | 1     | U/S                 | Ja    | Nej           |

**Kommentar:** Bevättningsriktning uppåt samt kanalbildning för samtliga.

### 8 h efter start

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevättningsriktning | Kanal | När övre kant |
|------|----------------|-------|---------------------|-------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | U                   | Ja    | Nära kanten   |
| 2    | Punkt          | < 1   | U                   | Ja    | Nej           |
| 9    | Spricka lodrät | < 1   | U/S                 | Ja    | Nej           |
| 10   | Spricka vågrät | < 1   | U/S                 | Ja    | Nej           |

**10 h 12 min efter start. Kamera slutar fungera för test 9.**

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|----------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | U                  | Ja     | Ja            |
| 2    | Punkt          | < 1   | U/S                | Ja     | Nej           |
| 9    | Spricka lodrät | < 1   | U/S                | Ja     | Nej           |
| 10   | Spricka vågrät | < 1   | U                  | Ja (+) | Nej           |

**16 h efter start**

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevätningsriktning | Kanal | Når övre kant |
|------|----------------|-------|--------------------|-------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | U                  | Ja    | Ja            |
| 2    | Punkt          | < 1   | U                  | Ja    | Ja            |
| 10   | Spricka vågrät | > 1   | U                  | Ja+   | Ja            |

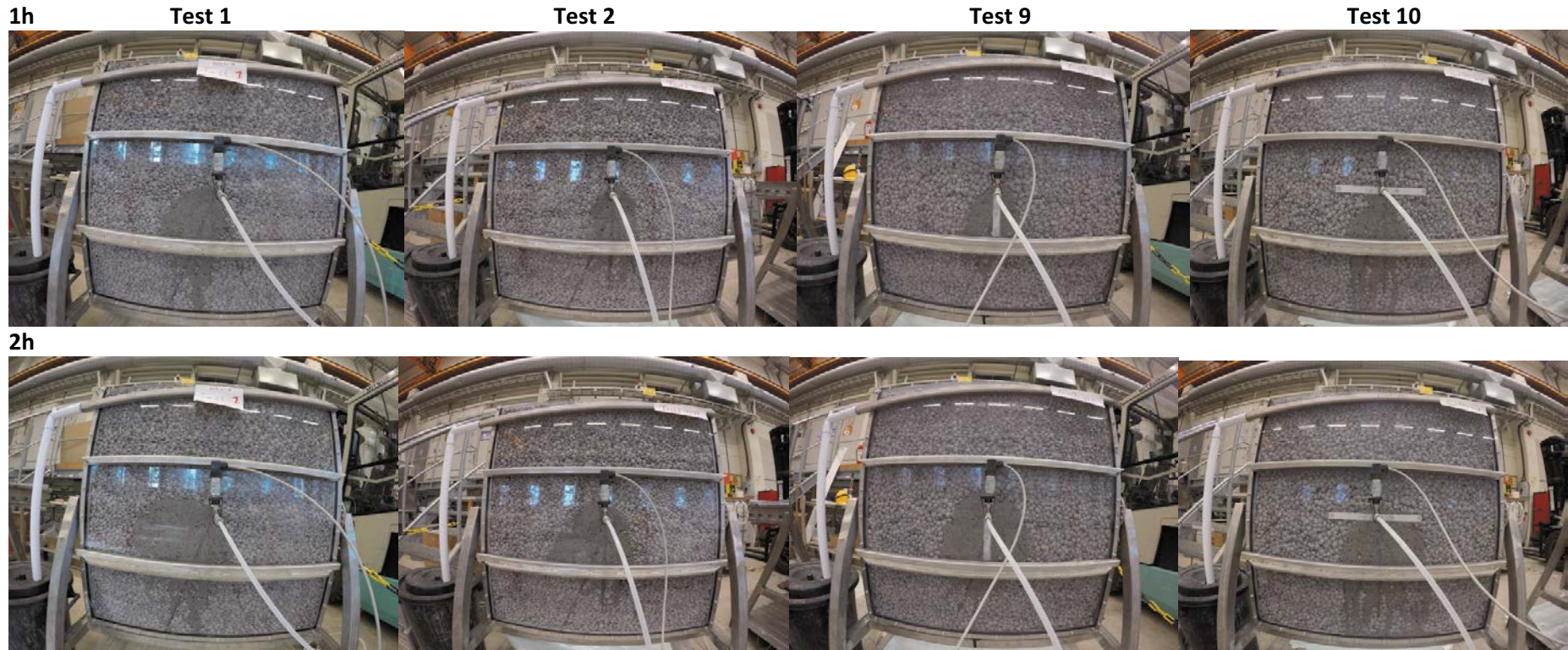
**24 h 51 minuter efter start. Stopp test 2.**

| Test | Inflödestyp    | Volym | Bevätningsriktning | Kanal  | Når övre kant |
|------|----------------|-------|--------------------|--------|---------------|
| 1    | Punkt          | 1     | U                  | Ja     | Ja            |
| 2    | Punkt          | < 1   | U                  | Ja (+) | Ja            |
| 10   | Spricka vågrät | > 1   | U                  | Ja (+) | Ja            |

**Sammanfattning:**

- Fram till 8 h efter start observeras för sprickor (test 9 och 10) en mer symmetrisk bevättningsriktning kring inflödet
- När stora kanaler bildas går bevätningen uppåt.









10h 12 min (stopp test 9, inga kort tagna efter denna tidpunkt)

Test 1

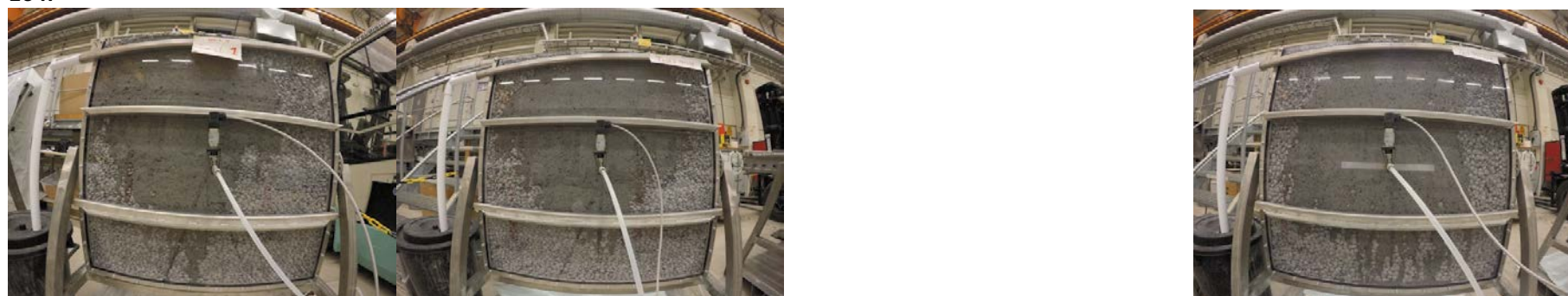
Test 2

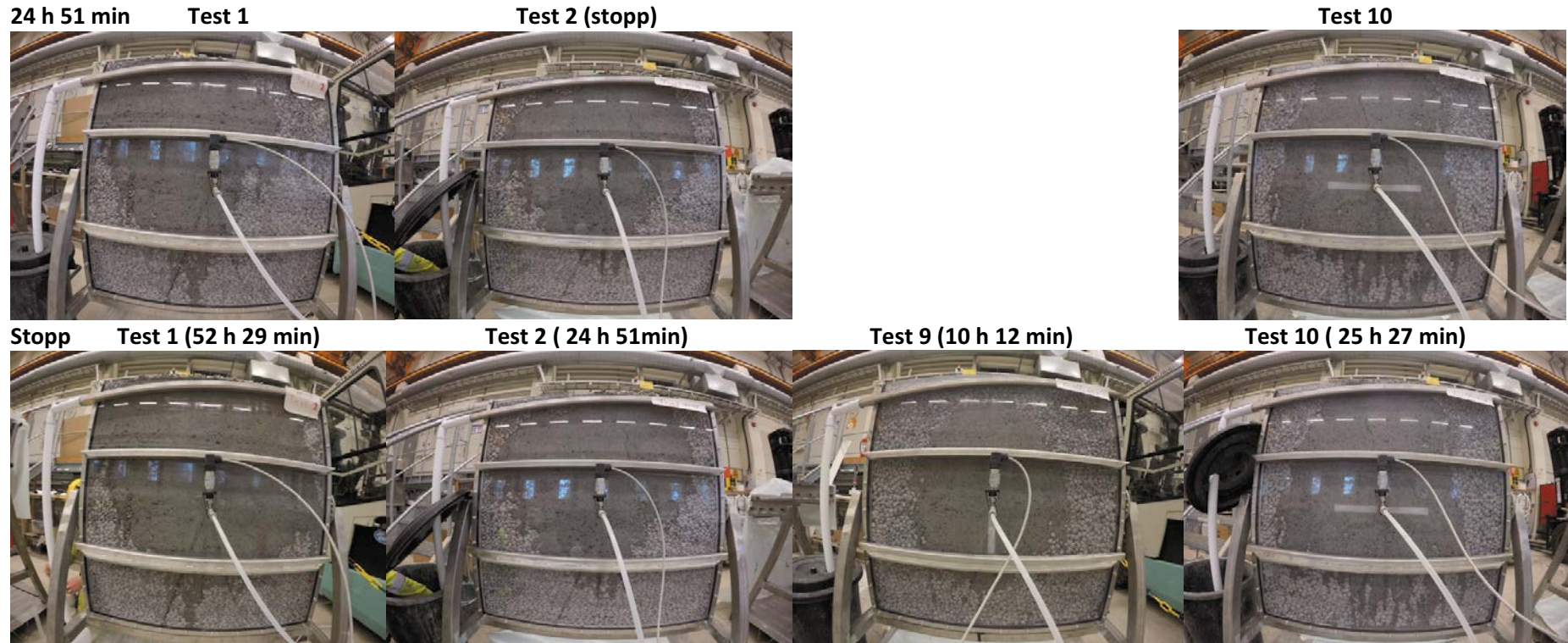
Test 9

Test 10



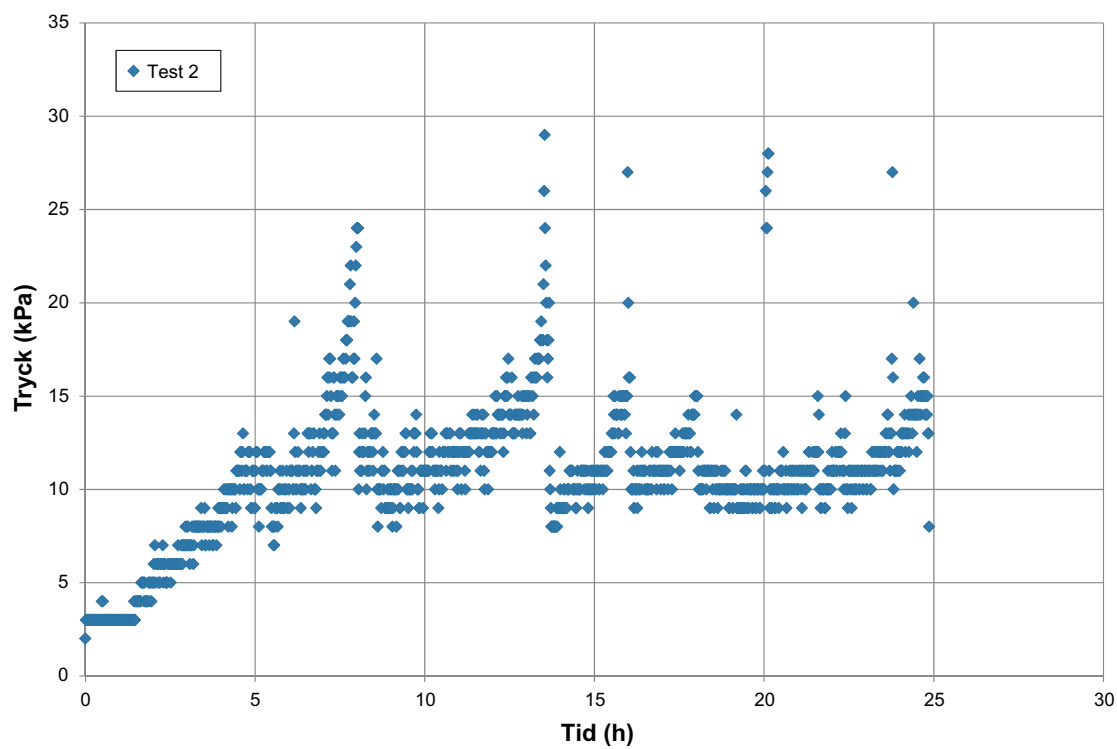
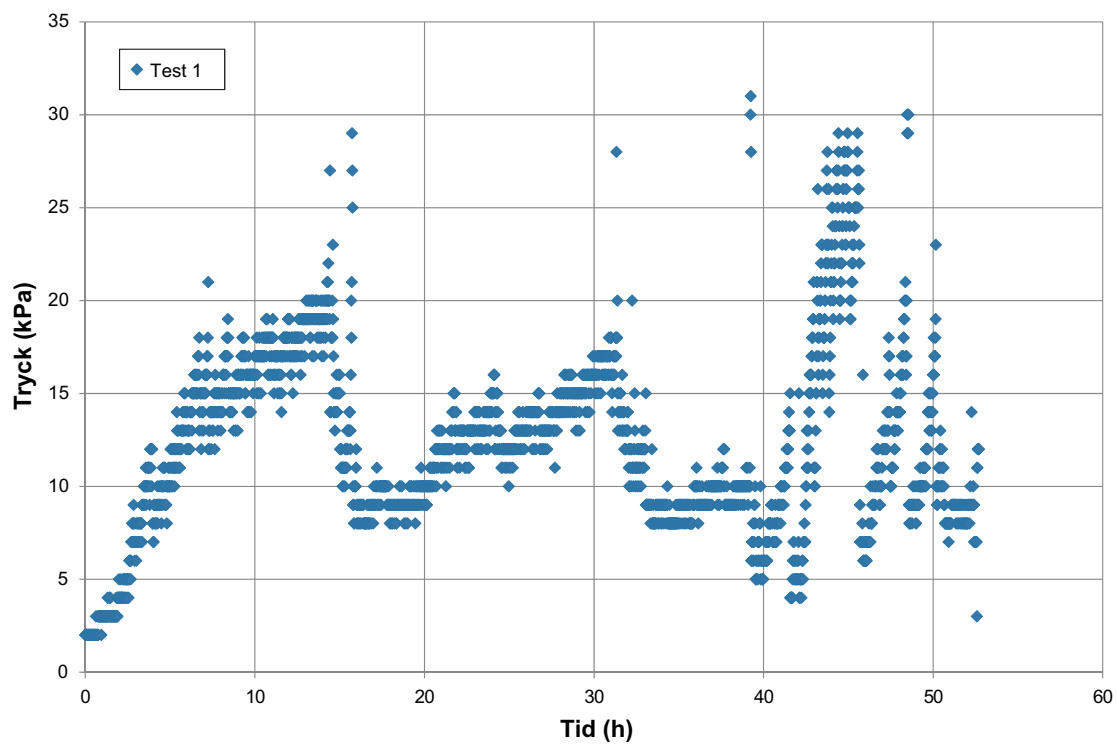
16 h

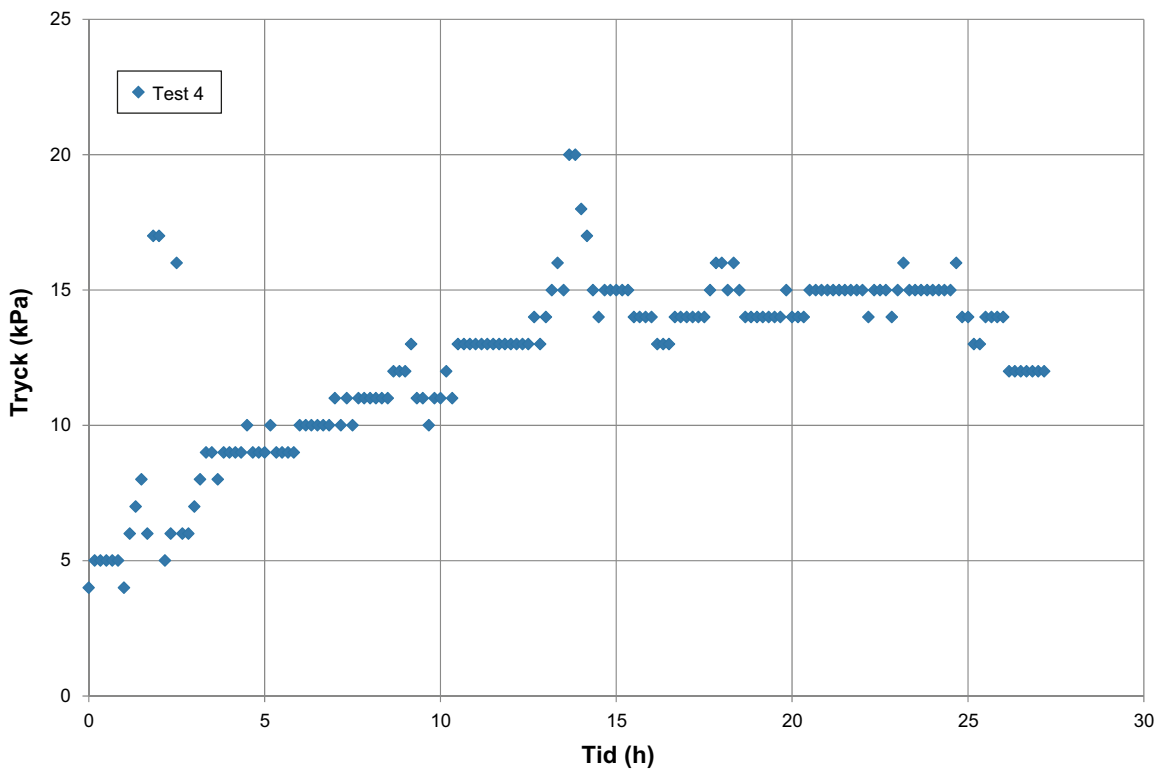
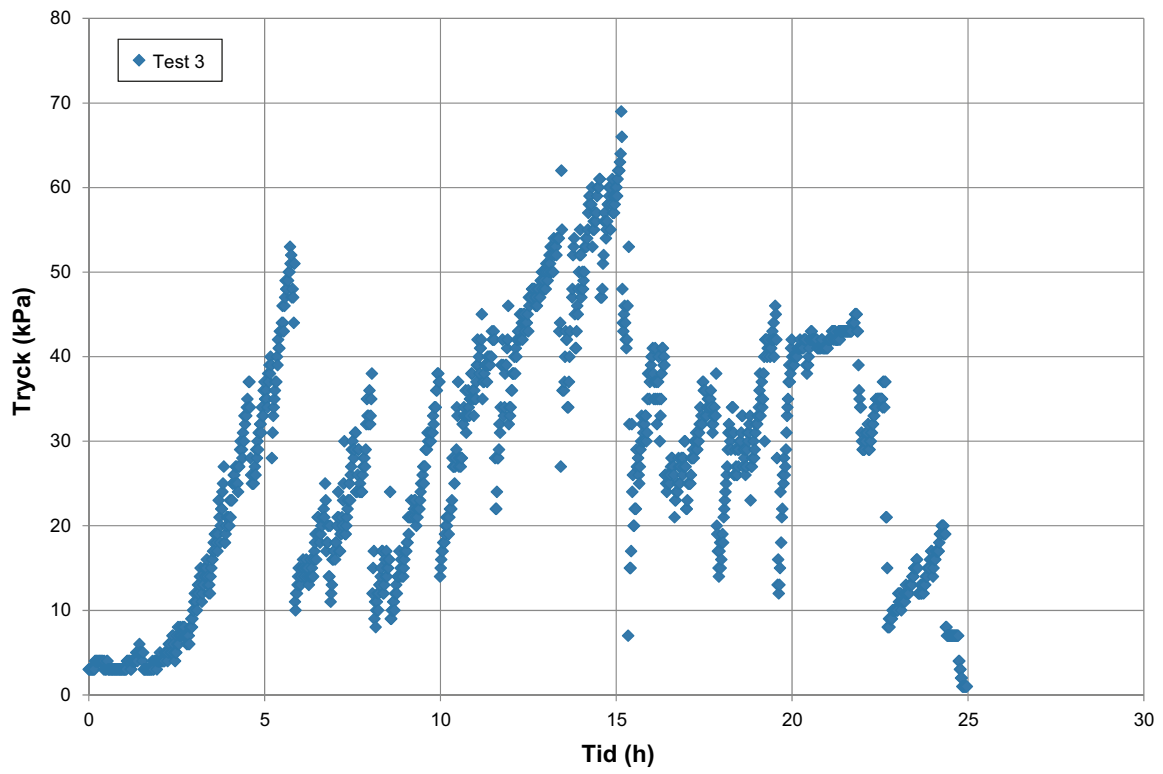


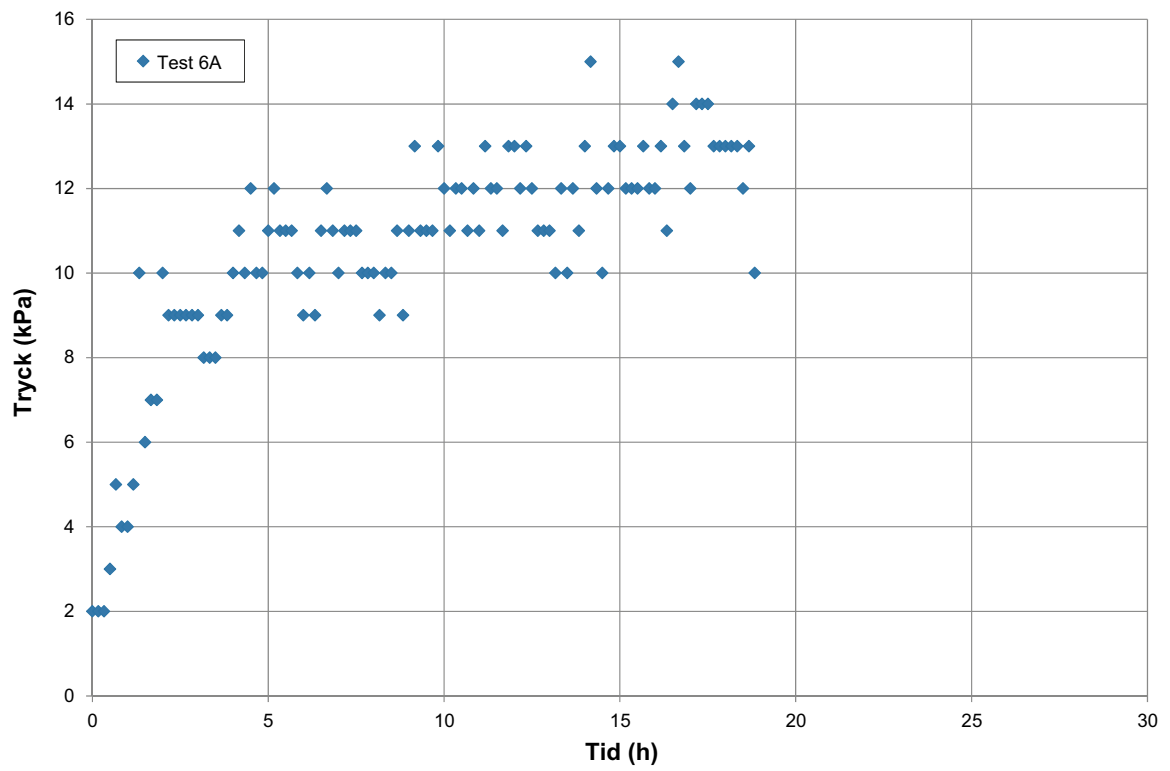
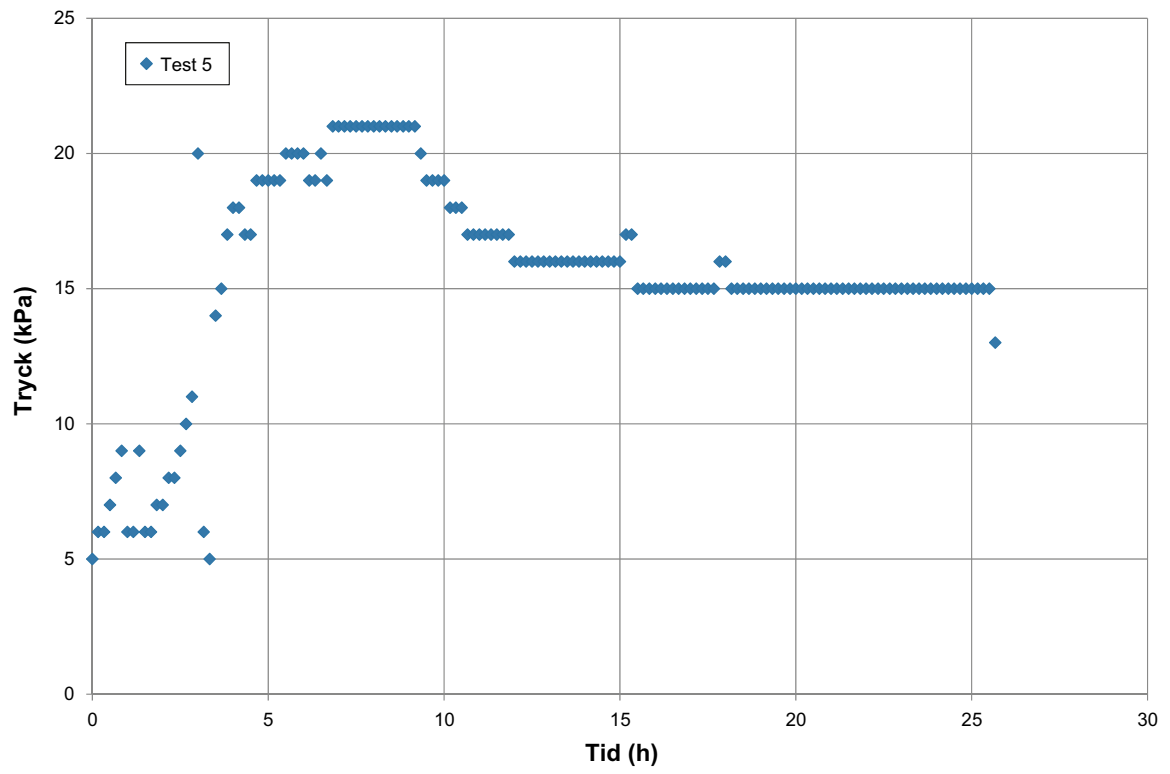


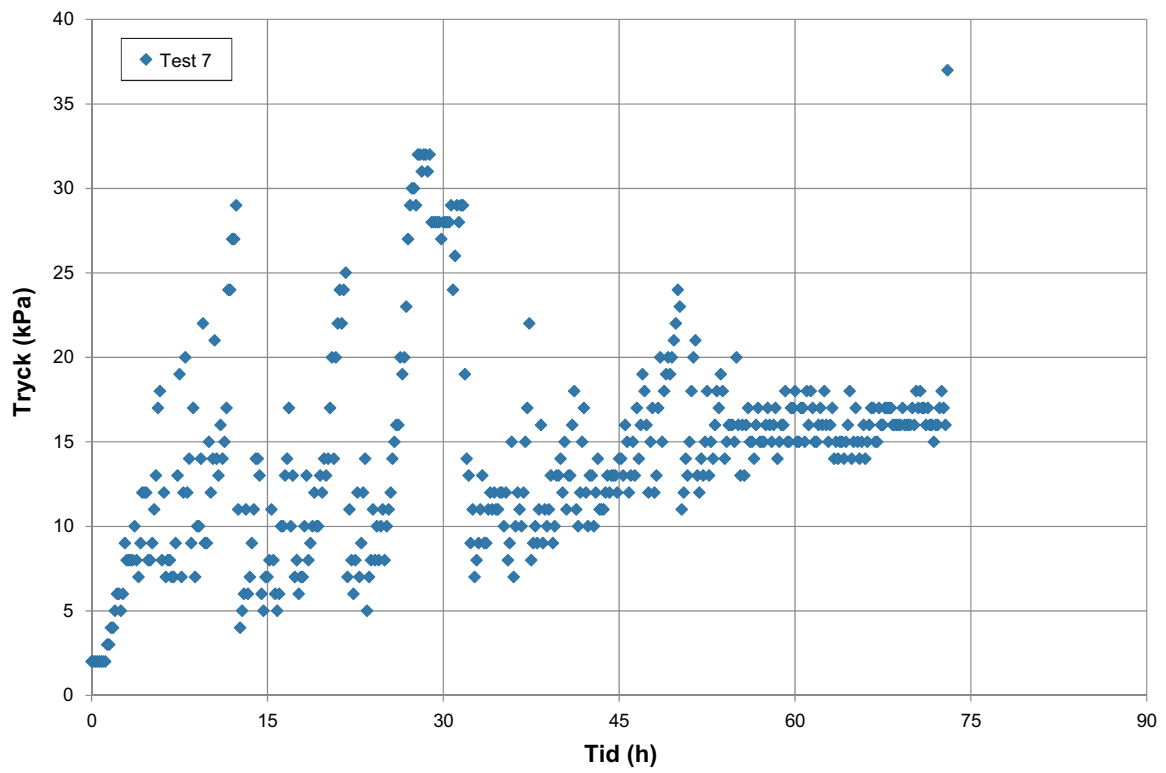
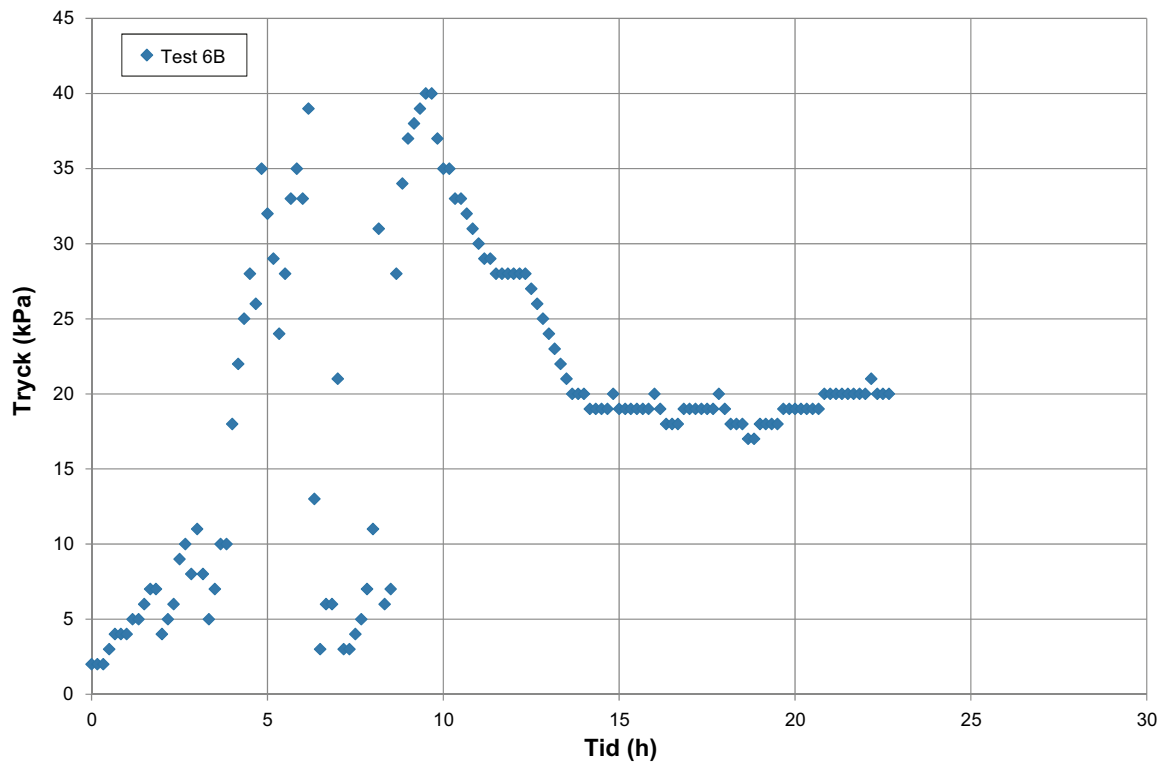
Observera att angiven stopptid inte motsvarar exakt den tidpunkt när vattnet når lådans övre kant. Stopptid motsvarar den tidpunkt då pumpen stoppas, med undantag test 9 där stopptiden motsvarar den tid då kameran slutade fungera och ta bilder.

Uppmäta vattentryck vid försöken

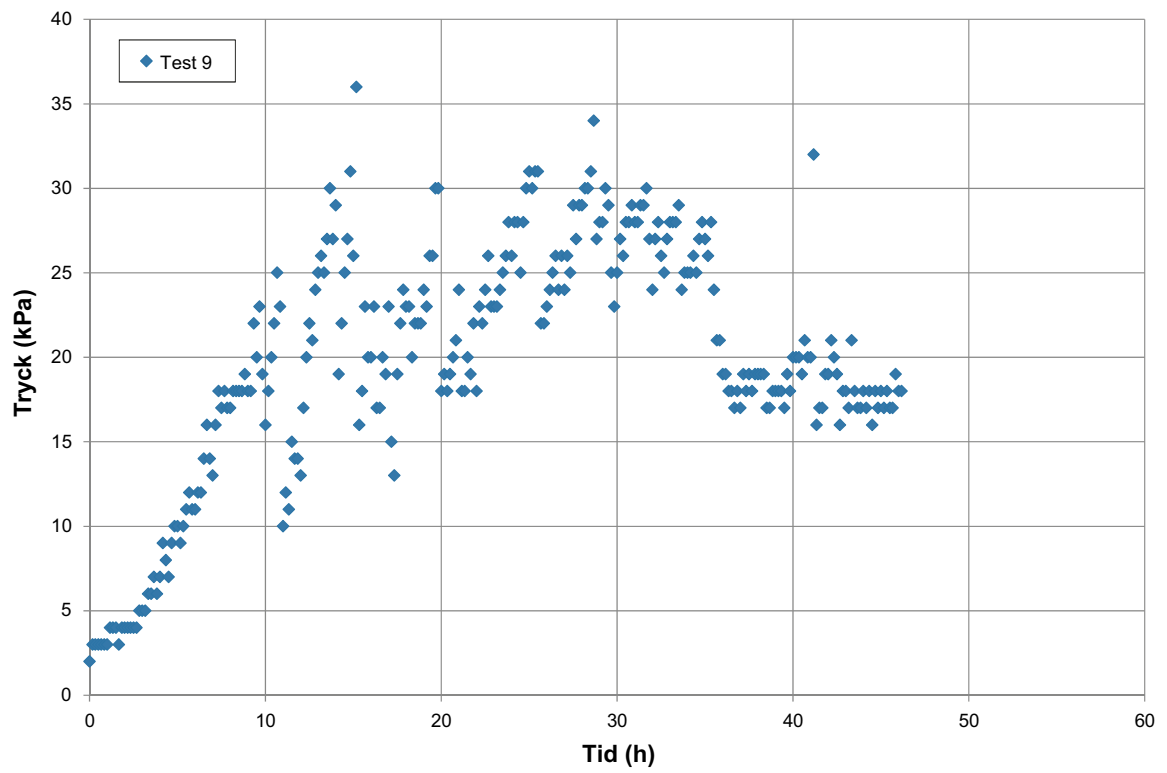
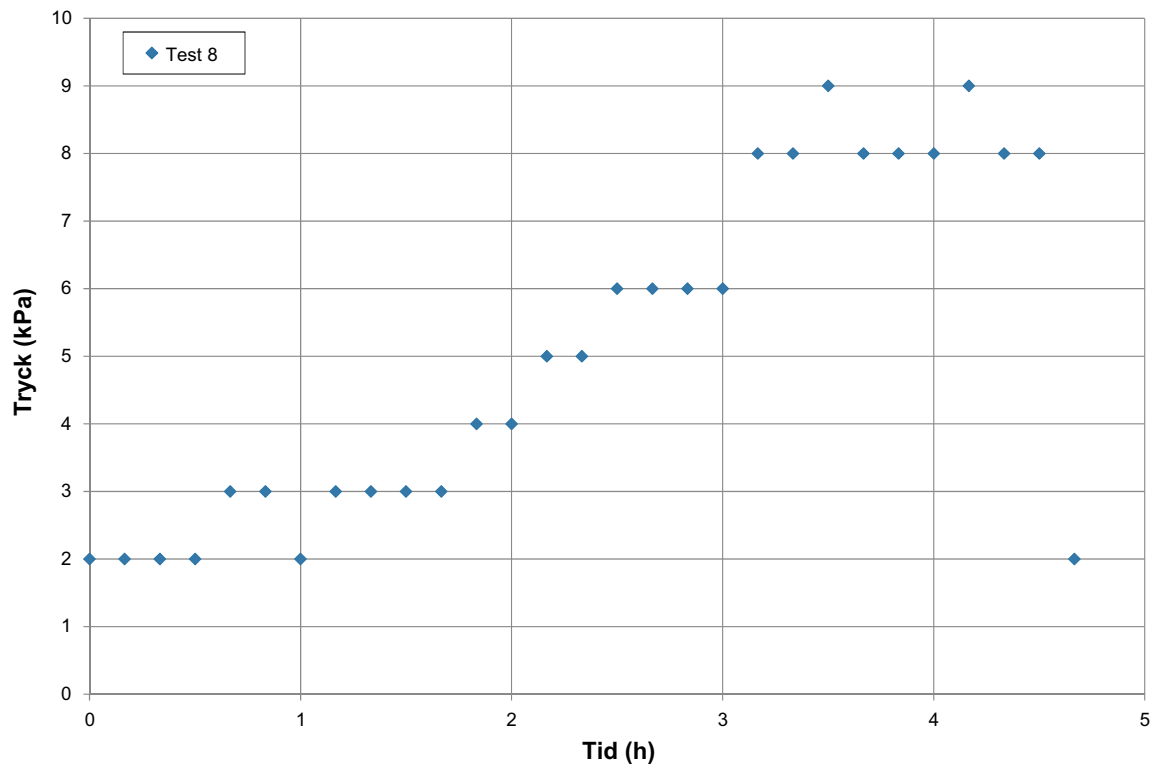


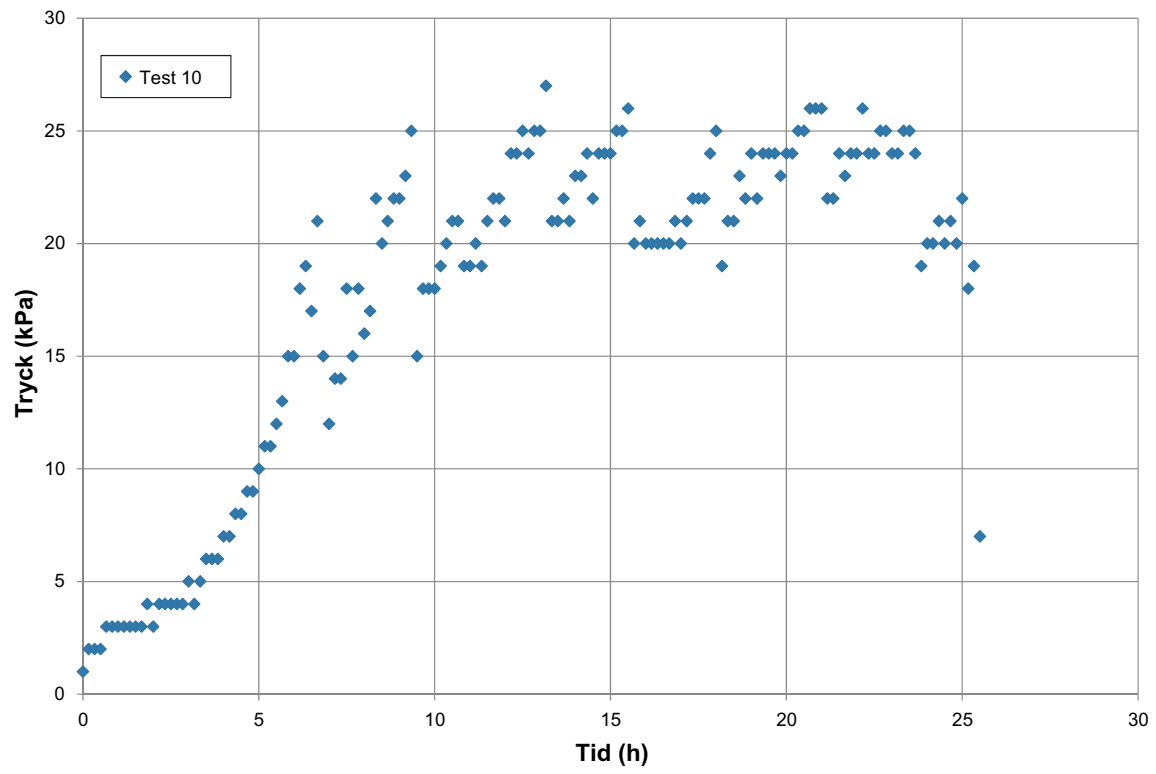












SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

**skb.se**