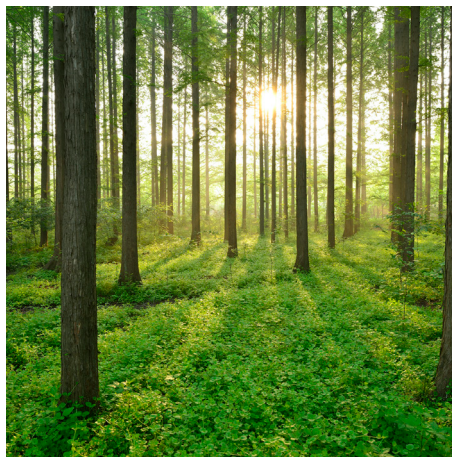


EGENSKAPSKRAV PÅ BITUMENMASSA TILL DILATATIONSFOGAR

RAPPORT 2024:1027



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Egenskapskrav på bitumenmassa till dilatationsfogar

LARS-ELOF BRYNE & ERIK NORDSTRÖM

ISBN 978-91-89919-27-3 | © Energiforsk juni 2024

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Bitumenmassa kan användas som en av flera barriärer i dilatationsfogar för betongdammar. Olika sorter har producerats under åren, och på senare år har läckage i dilatationsfogar rapporterats från flera vattenkraftproducenter. Bitumen kan både läcka ut vid höga temperaturer, och bli trögflytande vid låga temperaturer, vilken påverkar dessa funktion som tätande massa. Utredningar kring bitumens egenskaper i dessa sammanhang är sparsamma, och för miljövänligare alternativen behöver även dessa egenskaper definieras.

Projektet "Egenskapskrav på bitumenmassa till dilatationsfogar" har haft som mål att definiera de egenskapskrav hos fyllnadsmaterial som är lämpliga för rörelsefogar, i olika användningsområden. Detta för att underlätta inköp av fyllnadsmaterial till rätt kvalitet, antingen bitumen eller annat material.

Projektet har utförts av Lars-Elof Bryne och Erik Nordström, båda verksamma på Vattenfall R&D. Projektet har finansierats av Energiforsk genom FoU-programmet Betongtekniskt program vattenkraft, etapp 2019-2021. Programmets intressenter är Fortum Sverige, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Statkraft Sverige, Svensk Kärnbränslehantering, Sydkraft Hydropower, Tekniska Verken i Linköping, Umeå Energi och Vattenfall Vattenkraft. Projektets referensgrupp har utgjorts av representanter från programmets styrgrupp, Carl-Oscar Nilsson, Fredrik Nilsson och Martin Rosenqvist.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Egenskapskrav på bitumenmassa till dilatationsfogar

Bitumenmassa används ofta som en av tre barriärer i dilatationsfogar på betongdammar. De övriga två utgörs av fogband av koppar, rostfri plåt eller PVC. Historiskt har en del olika bitumenmassor använts även om den tidigare benämnda bitumensorten IB1500 (Industri Bitumen) blev den vanligaste och som användes av många anläggningsägare.

I början av 2000-talet blev det allt svårare att få tillgång till IB1500, särskilt i mindre mängder levererade på 20–200-litersfat. Vid ett par tillfällen samordnade sig kraftindustrins större ägare och köpte större volymer tappat på 200-litersfat för att få ner priset. Produkten IB1500 försvann dock ur standardsortimentet och Vattenfall lät 2008 genomföra analyser på bitumenkvaliteten IB1500 för att definiera vilka egenskaper som en likvärdig produkt skulle uppfylla. Resultatet blev att likvärdiga egenskaper kunde uppnås genom en blandning av två andra standardprodukter, nämligen V6000 och V12000 i ett blandningsförhållande 60/40 mellan de två. Idag saluförs en produkt som sägs utgöra ovanstående blandning under produktnamnet NYBIT8000 genom underleverantören Auson.

Under senaste åren har det inkommit rapporter om en ev. ökning av läckage av bitumen där det funnits en längre tid. Prover av bitumen har tagits ut på olika anläggningar och testerna visar att proven håller sig inom det spann på viskositet som leverantören utlovar. Det har dock blivit tydligt att spannet är väldigt brett och att rådande temperatur i omgivande betong har en mycket stor inverkan på vilken viskositet bitumenmassan har. Inne i en kraftstation där temperaturen kan vara hög i varma utrymmen riskerar massan att bli mycket lättflytande och läcka ut om det finns skador i fogband, fogbandsskarvar eller anslutning mot berg. På samma sätt kan bitumenmassan bli mycket trögflytande vid låga temperaturer vintertid i en ouppvärmad damm-del, möjligen med risk för att följsamheten hos fogen och återfyllning vid läckage inte blir tillräcklig.

Någon egentlig utredning om vilka lämpliga egenskaper bitumenmassan ska ha för att vara tillräckligt följsam när fogen rör sig, och kunna transporteras från påfyllningsställe långt ner i konstruktionen, verkar inte finnas. Om ett miljövänligare material skulle användas för att ersätta bitumen behöver också egenskapskraven definieras.

Målet med projektet är att definiera lämpliga egenskapskrav på fyllnadsmaterialet i rörelsefogar för olika användningsområden. Syftet är att underlätta inköp av fyllnadsmaterial med rätt kvalitet oavsett om det är bitumen eller något annat material.

Vid temperaturer ner mot -10 °C är det mycket troligt att bitumenmaterialet i en dilatationsfog uppvisar tillräcklig viskositet för att utfylla den volymförändring som uppstår vid en övergång från sommar till vinter under normala förhållanden

Funktionstesterna gav värdefull kunskap om bituminets beteende vid strömning i olika geometrier. Det reologiska beteendet för bitumen i försöksupställningen för

funktionstest är i princip lika för temperaturerna +10 respektive 0 °C. Dock är tidsförloppet betydligt längre vid 0 °C än vid + 10 °C.

Nyckelord

Dilatationsfog, bitumen, reologi, egenskapskrav, viskositet

Summary

Requirements on properties of bituminous material for dilatation-joints

Bituminous materials are often used as one of three barriers in a dilatation-joint on concrete dams. The two others are waterstops of copper, stainless steel or PVC. Historically, the bituminous material, earlier named, IB1500 became popular at most of the energy companies.

In the beginning of the 2000 it became difficult to find IB1500 on the market, especially in small quantities delivered on 20 -200 liters barrels. At some times, some of the larger hydropower owners together bought larger volumes to get the price down. The IB1500 was at last brought off the market and in 2008 Vattenfall did some testing of IB1500 to find a new bitumen quality with similar properties. The study resulted in a new product, NYBIT800, which was a mix of two different qualities delivered from Auson.

During the last years it has been reported that there has been some leakage of bitumen in some facilities. Samples were taken and sent to a laboratory for testing. The results showed that the values were within the interval demands that were promised. Though it was clear that interval was too broad. The viscosity as an example is very sensitive for temperature variations. The material can show a very low viscosity at high temperatures but also be very stiff at low temperatures. These variations can you find in a hydropower facility, warm inside the power station and cold in a dilatation-joint in a dam.

A real investigation of suitable properties of bituminous material within a dilatation-joint has not been performed. The material has been flowable when it is poured into the joint but also transported downward in the channel to the lower parts of a dam. If the material is changed to a more environmentally friendly substitute the properties have to be evaluated.

The goal with this project has been to define suitable properties for a filling material to be used in dilatation-joint for different applications. And also, be a support in the purchasing process.

At temperatures down to -10 °C it is most likely that the bitumen material in a dilatation-joint, will have enough viscosity so it can keep the joint watertight during a seasonal variation between summer and winter in normal conditions.

The functional tests gave valuable knowledge on the behaviour of the filling process of bitumen in different geometries- The rheological property in the functional test is almost the same at two different temperatures + 10 and 0 C. Though the filling process much longer in time at 0 °C compared to +10 C.

The filling time of a dilatation-joint system can be summarized at different temperatures, +10, 0 and -10 Deg C as hours, days and weeks or some months.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte & Mål	10
1.3	Genomförande	10
1.4	Avgränsningar	10
2	Material & Metod	11
2.1	Dynamisk och kinematisk viskositet - teori	11
2.1.1	Newtonska vätska	12
2.1.2	Strömning i rör	12
2.1.3	Viskositet hos bitumen	13
2.2	Bitumen	13
2.2.1	Allmänt om bitumenmaterialet	13
2.2.2	Specifikt om bitumenmaterialet i kraftverksdammar	14
2.3	Dilatationsfogar	15
2.3.1	Tätningssystem	15
2.4	Testmetoder	17
2.4.1	Tidigare utförda tester	17
2.4.2	Funktionell testmetod	18
2.5	Design av försöksupställning för funktionella tester	19
2.5.1	Beräkning av spaltvidder	19
2.5.2	Försöksupställning och utförande av funktionellt test	21
3	Resultat	25
3.1	Iterativ process mellan Vattenfall och VTI	25
3.2	Tidigare resultat från VTI (2008, 2019)	25
3.3	Resultat från Nya tester vid VTI	26
3.3.1	IB1500	
3.3.2	Blandningar av bitumen och oxiderat bitumen	27
3.4	Resultat från Funktionstester vid Vattenfall	28
3.4.1	Beskrivning av reologiskt förlopp	28
3.4.2	Uppskattning av transport av bitumen i kanal och spalt	33
4	Diskussion	36
5	Slutsats och framtida arbete	38
6	Referenslista	39

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Bitumenmassa används ofta som en av tre barriärer i dilatationsfogar på betongdammar. De övriga två utgörs av fogband av koppar, rostfri plåt eller PVC (Thorsell, 2004). Historiskt har en del olika bitumenmassor använts även om den tidigare benämnda bitumensorten IB1500 (Industri Bitumen) blev den vanligaste och som användes av många anläggningsägare (Nordström och Bryne, 2020).

I början av 2000-talet blev det allt svårare att få tillgång till IB1500, särskilt i mindre mängder levererade på 20–200-litersfat, då produkten hos leverantören Nynäs petroleum var liten och kostnaden för hantering stor. Vid ett par tillfällen samordnade sig kraftindustrins större ägare och köpte större volymer tappat på 200-litersfat för att få ner priset. Produkten IB1500 försvann dock ur standardsortimentet och Vattenfall lät 2008 genomföra analyser på bitumenkvaliteten IB1500 för att definiera vilka egenskaper som en likvärdig produkt skulle uppfylla. Resultatet blev att likvärdiga egenskaper kunde uppnås genom en blandning av två andra standardprodukter, nämligen V6000 och V12000 i ett blandningsförhållande 60/40 mellan de två. Idag saluförs en produkt som sägs utgöra ovanstående blandning under produktnamnet NYBIT8000 genom underleverantören Auson.

Under senaste åren har det inkommit rapporter om en ev. ökning av läckage av bitumen där det funnits en längre tid. Såväl Vattenfall som Statkraft har rapporterat detta (Nordström och Bryne, 2020). Prover av bitumen har tagits ut på två olika anläggningar och testerna visar att proven håller sig inom det spann på viskositet som leverantören utlovar. Det har dock blivit tydligt att spannet är väldigt brett och att rådande temperatur i omgivande betong har en mycket stor inverkan på vilken viskositet bitumenmassan har. Inne i en kraftstation där temperaturen kan vara hög i varma utrymmen riskerar massan att bli mycket lättflytande och läcka ut om det finns skador i fogband, fogbandsskarvar eller anslutning mot berg. På samma sätt kan bitumenmassan bli mycket trögflytande vid låga temperaturer vintertid i en uppvärmd damm-del, möjligen med risk för att följsamheten hos fogen och återfyllning vid läckage inte blir tillräcklig.

Någon egentlig utredning om vilka lämpliga egenskaper bitumenmassan ska ha för att vara tillräckligt följsam när fogen rör sig, och kunna transporteras från påfyllningsställe långt ner i konstruktionen, verkar inte finnas. Om ett miljövänligare material skulle användas för att ersätta bitumen behöver också egenskapskraven definieras.

Utöver rent specifika problemställningar i olika kraftstationer så rekommenderas att undersöka möjligheten till differentiering eller avsnävning av det accepterade intervallet för bitumenmassans viskositet. Omgivningsförhållanden (främst temperatur) för en inomhuskonstruktion i en uppvärmd kraftstation skiljer sig väsentligt mot en kallställd konstruktion ute vid en damm, vilket skulle kunna motivera att olika (för situationen anpassade) bitumenrecept används.

1.2 SYFTE & MÅL

Målet med projektet är att definiera lämpliga egenskapskrav på fyllnadsmaterialet i rörelsefogar för olika användningsområden. Syftet är att underlätta inköp av fyllnadsmaterial med rätt kvalitet oavsett om det är bitumen eller något annat material.

1.3 GENOMFÖRANDE

Uppdraget har utförts enligt följande moment:

- Litteraturgenomgång efter tidigare studier med fokus på egenskapskrav för bitumenmassa i dilatationsfogar. Erfarenheter från Sverige har eftersökts.
- Definition av vanliga randvillkor gällande den fysiska utformningen av dilatationsfogar (spaltvidder, rördiametrar, vinklar etc.) och rådande omgivningsklimat genom studie av ett antal objekt på både damm och kraftstationssidan.
- Teoretisk bedömning av lämpliga egenskapskrav för bitumenmassan.
- Utformning av försöksuppställning för test av mobilitet och följsamhet i fog under rörelse hos bitumen med olika viskositet vid olika temperaturer.
- Genomförande av praktiska försök för verifiering av föreslagna egenskapers lämplighet med fokus på mobilitet och förmåga till utfyllnad, påverkan på fogens dilaterande förmåga och bitumenmassans följsamhet vid olika förhållanden.
- Analys av möjligheterna och identifiering av miljövänligare alternativ för att ersätta bitumen.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

I detta arbete har ingen internationell utblick utförts utan enbart rörelsefogar i svenska dammar och vattenkraftanläggningar har studerats.

Studier har huvudsakligen behandlat problematiken vid låga temperaturer.

2 Material & Metod

I detta kapitel ges först en kort teoretisk inblick i det för bitumenmaterialet viktiga begreppet viskositet och dess temperaturberoende. Materialets reologiska egenskaper vid olika belastningshastigheter d.v.s. hur materialet flyter, strömmar och deformeras i olika geometrier som t.ex. rör och spalter, ges också en kort betraktelse.

Därefter beskrivs bitumen materialet och de olika tester som utförts. Dels standardiserade testmetoder som utförts på VTI men även ett funktionellt test, utformat och utfört i Vattenfallslaboratoriet i Älvkarleby. Det funktionella testet har inspirerats av en vanlig rörelsefog mellan betongmonoliter i en lamelldammskonstruktion.

2.1 DYNAMISK OCH KINEMATISK VISKOSITET - TEORI

Absolut viskositet eller dynamisk viskositet, η , beskriver förhållandet mellan skjuvspänningen, τ [N/m²] och skjuvhastigheten, γ [s⁻¹] när en yta med arean A parallellförskjuts relativt en annan yta med samma area med ett medium emellan.

Skjuvspänningen är pålagd den skjuvkraften per areaenhet

$$\tau = F/A \quad (1)$$

och skjuvhastigheten är hastigheten, v dividerat med avståndet, d , mellan ytorna,

$$\gamma = v[\text{m/s}] / d[\text{m}] \quad (2)$$

den dynamiska viskositeten definieras enligt ekv. 3

$$\eta = \tau/\gamma \text{ [Nm}^{-2}\text{s] [Pa s]} \quad (3)$$

Ett sätt att mäta den dynamiska viskositeten för en vätska är att rotera två plattor i förhållande till varandra med vätskan emellan plattorna eller rotera en cylinder nedsänkt i ett provrör med vätska mellan cylindern och provrörsväggen.

Att mäta den dynamiska viskositeten var tidigare komplicerat eftersom man måste hålla skjuvspänningen konstant och det var ofta mer praktiskt att mäta viskositeten genom självfall där tyngden av vätskan definierar den pålagda kraften. Man mäter då den s.k. kinematiska viskositeten. Den kinematiska viskositeten, ν , förhåller sig till den dynamiska viskositeten enligt ekv. 4

$$\nu = \eta / \rho \quad (4)$$

där ρ [kgm⁻³] är densiteten för vätskan. Enheten för kinematisk viskositet blir då [ms⁻¹]. Traditionellt uttrycker man kinematisk viskositet i centistokes. 1 cSt = [10⁻⁶m²s⁻¹] = 1 [mm²/s]. Vatten har kinematisk viskositet av 1 cSt vid 20°C.

Om densiteten för vätskan är 1000 kg/m³ (vilket inte är långt från sanningen när det gäller bitumen) så blir absoluta viskositeten 1 Pas ekvivalent med en kinematisk viskositet av 1000 mm² /s. Vatten har en dynamisk viskositet av 1 mPas

vid 20°C. En alternativ enhet för dynamisk viskositet är Poise (P). 1 cP (1 centiPoise) motsvarar 1 mPas.

2.1.1 Newtonsk vätska

En vätska för vilken viskositeten är konstant och oberoende av skjuvhastigheten sägs vara Newtonsk. Vid höga skjuvhastigheter blir i princip alla vätskor icke-Newtonska. I den aktuella applikationen med bitumen i rörelsefogar som kännetecknas av mycket långsamma temperaturinducerade rörelser så är det relativt okomplicerat att utgå från att bitumen uppför sig Newtonskt, i alla fall ner till låga temperaturer där bitumen får en extrem styvhet och begränsad relaxationsförmåga.

2.1.2 Strömning i rör

Poiseuilles lag beskriver flödet i ledningar med cirkulärt tvärsnitt. Lagen kan generaliseras så att den kan beskriva flödet i ett rör med godtyckligt tvärsnitt. Sambandet förutsätter att flödet är laminärt (flödet är laminärt när det s.k. Reynoldstalet är mindre än ca 2000. För cirkulära rör är Reynoldstalet lika med $v \cdot D / \nu$, där v är medelflödes hastigheten [m/s] vilket är lika med hälften av maximala flödes hastigheten, D är rörets diameter [m] och ν är vätskans kinematiska viskositet [m²/s].

Ett sätt att uttrycka Poiseuilles lag är enligt ekv.5

$$Q = \pi g h_f D^4 / 128 L \nu \quad (5)$$

Där

Q är flödet [m³/s];

g är tyngdaccelerationen [m/s²];

h_f är strömningsförluster;

L är längden på röret.

Om man bortser från strömningsförluster kan man uttrycka Poiseuilles lag enligt ekv. 6

$$\Delta p = 8 \pi \eta L Q / A^2 \quad (6)$$

Där

Δp är tryckskillnad mellan inlopp och utlopp;

η är dynamisk viskositet;

A är rörets tvärsnittsarea.

Från Poiseuilles lag framgår att flödet är omvänt proportionellt mot vätskans viskositet och rörets längd samt att flödet är kvadratisk proportionellt mot rörets area. För skrovliga rör, diken etc., så kan man istället beräkna flödet med Mannings formel.

2.1.3 Viskositet hos bitumen

Viskositeten hos bitumen är starkt temperaturberoende. Materialet är viskoelastiskt. Vid snabba förlopp och/eller vid låga temperaturer så dominerar den elastiska egenskapen (som ett fast ämne) och vid långsamma förlopp och/eller vid höga temperaturer så uppför sig materialet visköst. I applikationen med bitumen i rörelsefogar så är rörelserna / skjuvhastigheterna så långsamma att vi fokuserar på materialets viskösa egenskaper.

Williams, Landel och Ferry (WLF) visade på ett empiriskt samband mellan viskositet vid olika temperaturer för tex polymersmältor. Enligt Chehab m.fl. (2002), WLF-ekvationen användas ovanför ett materials glastemperatur, vilket för asfalt ligger runt -30°C. För bitumen kan glastemperaturen variera mellan -10.5 – 22.5 °C och för polymermodifierad bitumen variera glastemperaturen mellan -16.8 och -25.7 °C (Apostolidis m.fl., 2021).

WLF-Ekvationen beskrivs enligt ekv. 7

$$\log \eta/\eta_{\text{ref}} = (-C_1(T-T_{\text{ref}})) / (C_2 + (T-T_{\text{ref}})) \quad (7)$$

För bitumen är konstanterna C_1 och C_2 ofta i närheten av 8.5 respektive 115.

Konstanterna C_1 och C_2 är beroende av vilken råolja bituminet är utvunnet ifrån och destillationsprocessen.

I produktionsprocessen ingår ofta ett steg där bituminet blåses. Den oxidation som sker gör produkten hårdare och samtidigt blir produktens viskositet något mindre temperaturberoende. Blåser man bitumen kraftigt så får man en produkt som blir mycket hård och glasartad. Blåst bitumen används i vissa industriella applikationer där man önskar en produkt med lägre temperaturkänslighet som inte behöver vara så flexibel som bitumen för vägändamål.

Temperaturkänsligheten hos bitumen beskrivs ofta med ett penetrationsindex (PI). Detta index bygger på mätning av penetrationsvärde och mjukpunkt. PI är oftast i intervallet mellan -1.5 och +0.7 för bitumen för vägändamål där högre värde anger en lägre temperaturkänslighet. De produkter som testats för rörelsefogar i dammar har så låg viskositet att det är opraktiskt att mäta penetrationsvärde och mjukpunkt för dem.

2.2 BITUMEN

2.2.1 Allmänt om bitumenmaterialet

En av den största användningen av bitumen är inom vägbyggnadsområdet, som ytbeläggning vilket är allmänt känt sedan länge, därav kan den största delen av forskningen hittas i detta område. Bitumen fungerar som bindemedel i asfalt. Asfalt är tekniskt en blandning av sten, grus och bitumen, ungefär som betong, men i detta fall fungerar bitumen som bindemedel.

Vad gäller asfaltforskningen handlar ett av de huvudsakliga problemen om att undvika s.k. spårbildning vilket egentligen huvudsakligen är skjuvskador uppkomna av frekvent fordonsbelastning (Zhu m.fl., 2020). En viktig egenskap som söks hos bitumen är skjuvmotstånd men även adhesion mot ballastmaterialet. Utmattningsegenskaper är också viktigt hos bitumen. Utöver den mekaniska belastningen läggs också en stor temperaturvariation, vinter och sommar som extremer. Asfaltmaterialet är känsligt för temperaturvariationer i kombination med belastningshastigheten materialet utsätts för (Chen m.fl., 2022).

Bitumen som material är ett viskoelastiskt material där viskoelasticiteten varierar med temperaturen. Vid låga temperaturer uppför sig bitumen i princip som ett rent elastiskt material och vid hög temperaturer har materialet rent viskösa egenskaper, det flyter helt enkelt. Däremellan är materialet viskoelastiskt i olika grad (Imeri och Maka, 2021).

Rent mekaniskt kan materialet betraktas som både linjärt och olinjärt. Vid låga deformationer gör man ofta en linjär betraktelse av hållfastheten medans vid större deformationer, behövs ett olinjärt tillvägagångssätt. I de flesta fall är det första, linjära, betraktelsesättet som används (Imeri och Maka, 2021).

De flesta problem som uppstår i asfalt är bundna till bindemedelsfasen i mixen, vilka är: adhesions brott (fuktskador), kohesion brott inom bitumen (uppsprickning) (Pstrowska m.fl., 2022), utmattningsbrott, och permanent deformation (spårbildning) (Zhu m.fl., 2020).

På senare år har även mer studier om biobaserat bindemedel påbörjats, detta då bitumen utvinns ur råolja dvs en fossil råvara (Lerjefors och Wittboldt, 2021; Ingrassiaa m.fl., 2019; Gaudenzi m.fl., 2023). En biobaserad råvara stämmer bättre överens med ett framtida cirkulärt samhälle. I första hand har man sneglat mot olika former av tallolja som del-ersättning av bitumen. Studier har gjorts där en del av bitumen har bytts ut mot t.ex. lignin.

2.2.2 Specifikt om bitumenmaterialet i kraftverksdammar

Industribitumen är det material som traditionellt använts i dilatationsfogar i vattenkraftens infrastruktur, dels i kraftstationsbyggnader men även i dämmande konstruktioner.

Den s.k. Fraass punkten är den temperatur som materialet vid en viss standardiserad dragbelastning enligt (SS-EN 12593:2015) kommer att spricka. Detta kan vara av intresse om det råder tillräckligt bra adhesion mellan bitumenmaterialet och betongytan, vilket leder till en töjning i bitumenmaterialet. Klarar bitumenmaterialet töjningen utan att spricka vid t.ex. -10 °C?

I vattenbyggnadssammanhang önskar vi ett något mindre flytande bitumen vid höga temperaturer. Samtidigt får det inte bli för styvt vid låga temperaturer.

Tidigare krav på bitumen till rörelsefogar var att använda Nynäsprodukten IB1500 inom Vattenfall. Fogarna har i modern tid fyllts på med en produkt vid namn NYBIT8000 vilket sannolikt är den produkt som blandades i 60/40-förhållandet

vilket syftar till att ge en viskositet strax under 8000 (~7900) mm²/s. Leverantören av NYBIT8000 är Auson och inte som tidigare Nynäs petroleum. Auson köper dock råvaran från Nynäs och emballerar det i 20–200-liters fat.

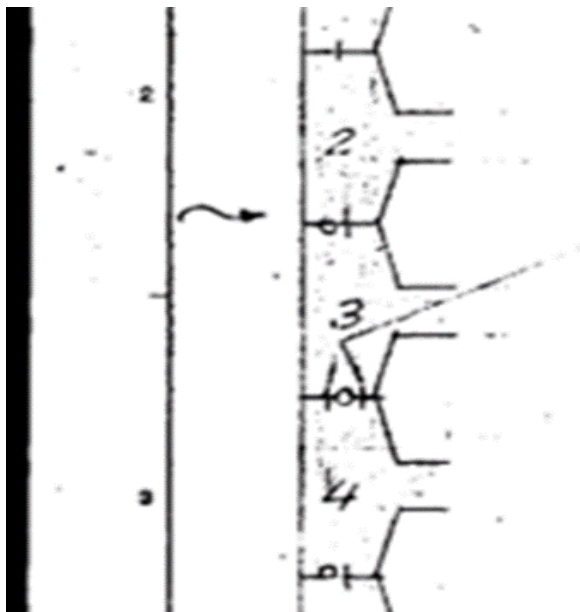
2.3 DILATATIONSFOGAR

Läckande dilatationsfogar är ett förekommande problem vid dammanläggningar. Problem med läckage finns även i kraftverkskonstruktioner. Dilatationsfogar förväntas medge säsongsb beroende rörelser i konstruktionen. Beträffande dämmande konstruktioner ska dilatationsfogen även vara vattentät över tid. Nämda krav innebär att det i dilatationsfogen ingjutna tätbandet och den fyllda bitumen kanalen ska uppfylla en komplex kravbild där bandet och bituminet ska medge rörelser samtidigt som det kan utsättas för stora variationer i vattentryck och temperatur (Thorsell, 2004). Exempel på dilatationsfogar visas i Figurerna 2.1–5.

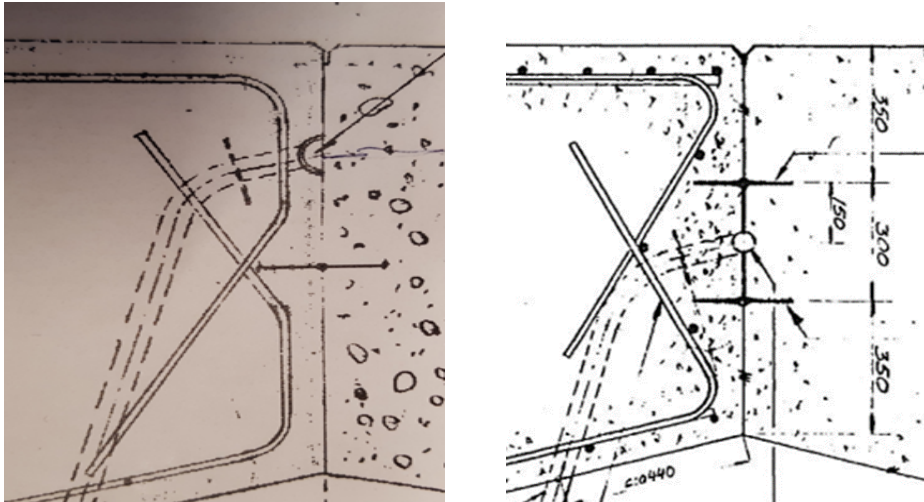
2.3.1 Tätningssystem

Enstegstättning och tvåstegstättning

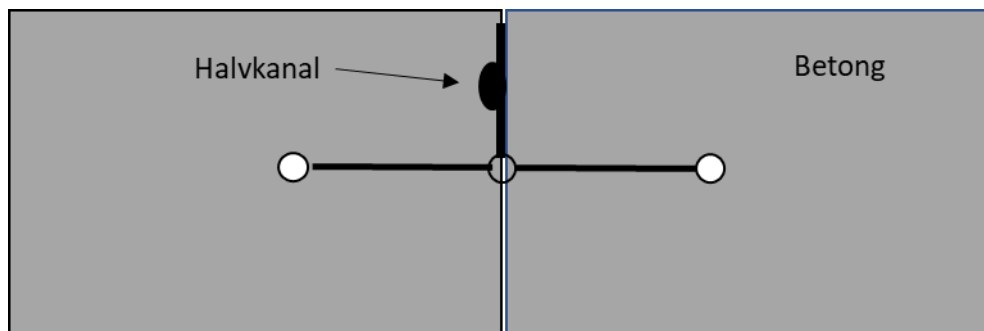
Praktiska erfarenheter har visat att enstegstättade fogar, se Figur 2.1–2.4, har varit otäta, vilket lett till att dilatationsfogar i dammkonstruktioner ofta utformas med dubbla tätningsanordningar, se Figur 2.2 och 2.5 (Thorsell, 2004). Utöver de dubbla tätningsbanden förses vanligtvis dilatationsfogarna med ett ytterligare tätningskomplement, en asfaltsfylld (eller rättare sagt bitumen) kanal som vanligtvis är placerad mellan banden se Figur 2.5. Denna kanal kan vara trycksatt och/eller uppvärmd vid behov. Det finns även lösningar med kanal vid enstegstättning, se Figur 2.3–2.5 i detta fall verkar bituminet vara i direkt kontakt med vattentrycket på överstömssidan, det dämnda vattnet.



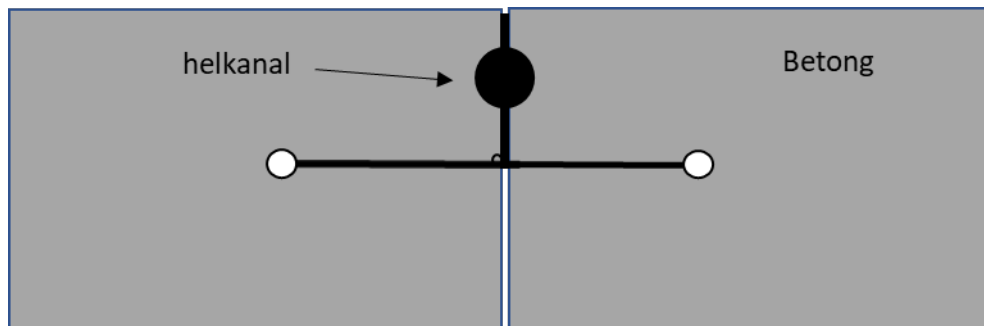
Figur 2.1. Enstegs och tvåstegstättningar i samma damm kropp, med och utan kanal.



Figur 2.2 Detaljritning av enstegs- respektive tvästegstättning med halv kanal respektive hel kanal för bitumen.

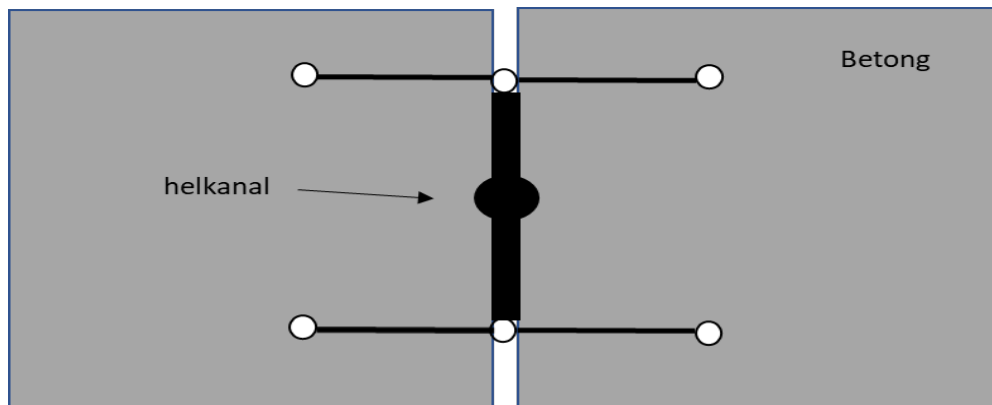


Figur 2.3. Schematisk bild av enstegstättning med halv bitumenkanal.



Figur 2.4. Schematisk bild av enstegstättning med hel bitumenkanal.

Fogarna som schematiskt illustreras i 2.3–4 är i verkligheten bara någon millimeter se ritning i Figur 2.2 vänster bild, så det sker nog bara ett ytterst litet läckage av bitumen om överhuvudtaget något alls. Bitumenmaterialet blir ganska stelt vid kontakt med luft och det är nog bara vid höga temperaturer under sommarhalvåret som materialet kan bli rinnande.



Figur 2.5. Schematisk bild av tvåstegstättning med hel bitumenkanal.

2.4 TESTMETODER

2.4.1 Tidigare utförda tester

Nedan visas först en sammanställning av de standardiserade tester som utförts av VTI för både Vattenfall och Statkraft. Dessutom redovisas vilka material som testats vid de olika tillfällena.

Sedan följer en mer detaljerad summering av testerna och materialen som testats.

Tabell 2.1 visar en översikt av alla tester och vilka material som testats vid de olika tillfällena.

Tabell 2.1 Standardtester utförda hos VTI för Vattenfall (Vf) och Statkraft (Stk).

Standard- tester VTI	Vf 2008			Vf 2019	Stk 2019	Vf 2022	
Material	IB1500	V6000	V12000	NYBIT8000	NYBIT8000	IB1500	IB1500
Metoder							
SS-EN 14771:2005	x	x	x				
SS-EN 12595:2007	x	x	x		x		
SS-EN 12596:2007	x	x	x				x
SS-EN 14771:2012				x	x	x	x
SS-EN 12595:2014				x			x
SS-EN 14770:2012					x	x	

I en intern Vattenfall-rapport (Nordström och Bryne, 2020) konstateras läckage av bitumen i olika vattenkraftsanläggningar och dammar i Sverige. Nedan följer en kort beskrivning av vilka tester som tidigare utförts med hjälp av VTI och som sammanfattas i rapporten.

2008 Vattenfall

Material som testades var IB 1500, V6000 och V12000.

Proverna analyserades med avseende på styvhet vid låga temperaturer i en böjbalksreometer enligt SS-EN 14771:2005, samt med avseende på kinematisk viskositet vid 50°C enligt SS-EN 12595:2007 och med avseende på dynamisk viskositet vid 25°C enligt SS-EN 12596:2007.

2019 Vattenfall

Provmaterial som testades var NYBIT8000 (ca 60% V6000 och 40% V12000).

Provet analyserades med avseende på styvhet vid låga temperaturer i en böjbalksreometer enligt SS-EN 14771:2012, samt med avseende på kinematisk viskositet vid 60°C enligt SS-EN 12595:2014.

2019 Statkraft

Provmaterial som testades var Ny bitumen 2019 och Gammal bitumen

Provmaterialen analyserades styvhet vid låga temperaturer i en böjbalksreometer enligt SS-EN 14771:2012, samt med avseende på komplex skjuvmodul, fasvinkel och komplex viskositet vid högre temperaturer i en dynamisk skjuvreometer enligt

SS-EN 14770:2012. Provet 'ny bitumen 2019' analyserades med avseende på kinematisk viskositet vid 60°C enligt SS-EN 12595:2014.

Nya utförda tester hos VTI

IB 1500 från ursprungsproduktet (fat från Uniper till Vattenfall, 2022). Provet analyserades med avseende på styvhet vid låga temperaturer i en böjbalksreometer enligt SS-EN 14771:2012, samt med avseende på kinematisk viskositet vid 60°C enligt SS-EN 12595:2014 och med avseende på dynamisk viskositet vid 25°C enligt SS-EN 12596:2007.

2.4.2 Funktionell testmetod

Funktionstester har utförts i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby. Testet har försökt att efterlikna tillståndet i en rörelsefog mellan två monoliter i en lamelldamm, se höger bild i Figur 2.2.

Försöksuppställningen och testutförandet beskrivs kapitel 2.5. Testerna utfördes vid 0 respektive +10 °C. Test var planerat även vid -10 °C, men klimatrumsrummet var inte tillräckligt stabilt, temperaturen varierade för mycket.

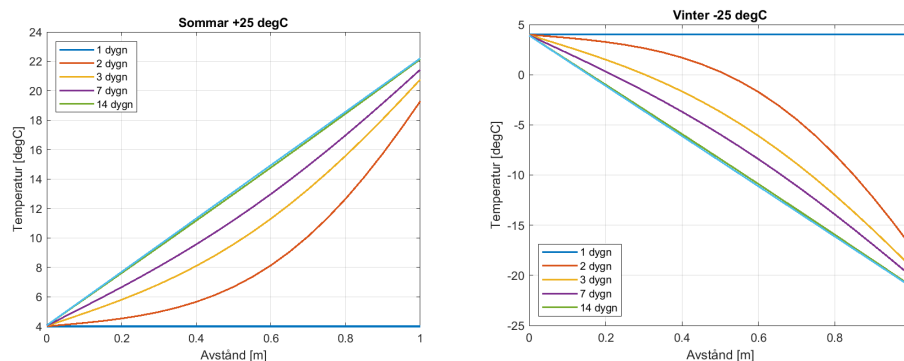
2.5 DESIGN AV FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING FÖR FUNKTIONELLA TESTER

Funktionstester har utförts med fokus på reologi med syfte att studera bitumenmaterialets beteende i en dilatationsfog vid olika temperaturer under sommar respektive vinterförhållanden.

Vid designen av funktionstesterna har främst ritningar med olika dilatationsfogslösningar gåtts igenom, både enstegs- och tvåstegslösningar har studerats. Det slutgiltiga valet blev en variant av en tvåstegslösning med en kanal om ca 100 mm diameter, se höger bild i Figur 2.2. Tanken är att man delar en sådan fog mitt itu och placerar en plexiglasskiva i mitten av fogen så att vi kan studera hur reologin ser ut, dvs hur bitumenmaterialet rör sig i fogen. En tunn spalt har också tagits med i försöksuppställningen.

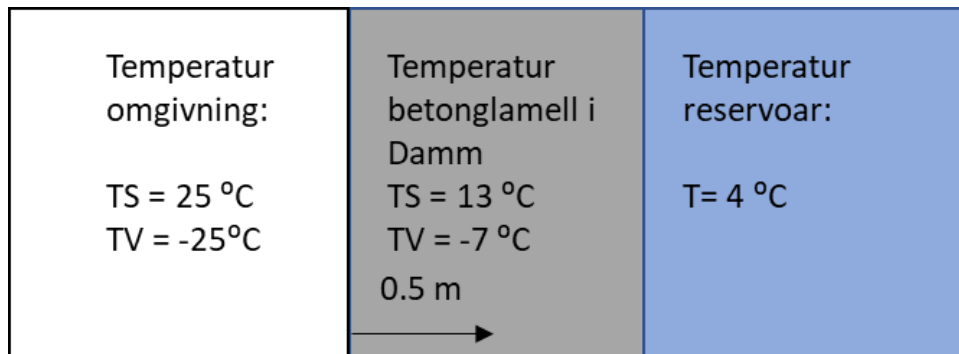
2.5.1 Beräkning av spaltvidder

Beräkning av spaltvidder för vinter respektive sommar fall enligt modell i Enzell och Tollsten (2017). Figur 2.6 visar resultaten av en simulerad situation, där omgivningstemperaturen för sommarsituationen är + 25 °C och för vintersituationen är - 25°C. Vattenreservoarens temperatur antas vara + 4°C i båda fallen.



Figur 2.6. Simulering av temperaturintervall (Enzell & Tollsten, 2017).

Anta att fogen sitter i centrum av betongkroppen, dvs ca 0.5 m, se Figur 2.6–7. Figur 2.7 visar en schematisk bild av damm lamellen med omgivande luft och vattenreservoaren. I centrum av betongdelen antas fogen vara placerad. Vid långvarig, mer än 14 dagar, temperatur vintertid samt sommartid ger en vinter- och sommartidstemperatur på -7°C respektive $+13^{\circ}\text{C}$ dvs ett temperaturspann på 20°C .



Figur 2.7. Schematisk bild av betonglamellen mittemellan den omgivande luften och reservoarens vatten. Sommartemperatur (TS) och vintertemperatur (TV).

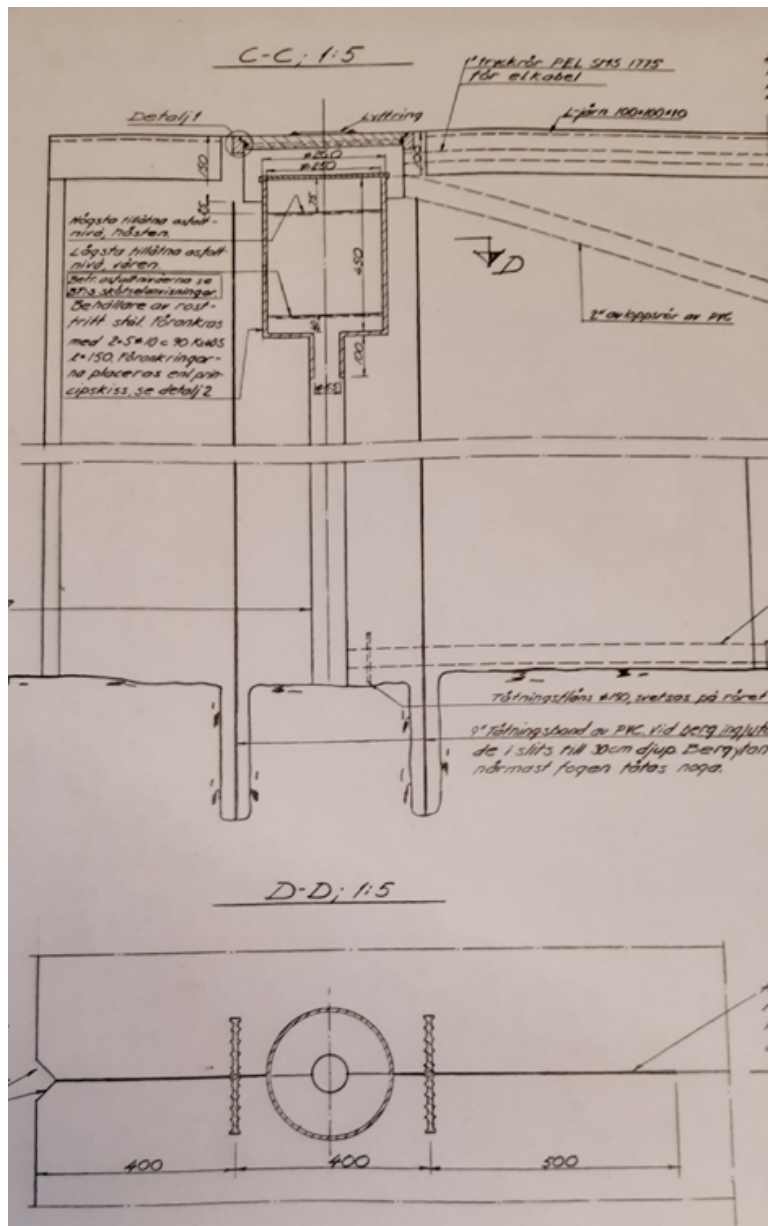
Beräkning av fogrörelser för sommar respektive vintercykel enligt nedan:

Medelvärdet för betongens längdutvidgningskoefficient (Löfqvist, 1946) är ca $10 \cdot 10^{-6} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$ (ΔL). Variationen i medeltemperatur över betongkonstruktionen mellan sommar och vinter är $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (ΔT) och beräknat på en 10 m bred monolit (L_m) ger:

$$L_R = \Delta L \cdot \Delta T \cdot L_m \quad (8)$$

$$= 10 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10 = 0.002 \text{ m} = 2 \text{ mm.}$$

Rörelsefogen kommer att öka med 2 mm från sommar till vinter.



Figur 2.8. Ritning för studerad spalt med bitumenbehållare.

Intressant data från ritningsdetaljen i Figur 2.8 är att behållaren har en högsta och lägsta nivå med bitumen för höst respektive vår. Om hela volymen som måste fyllas på är mellan dessa nivåer får man med en enkel beräkning och med antagandet att bitumen endast finns mellan fogbanden och att hela volymen tas upp i den rektangulära volym som bildas då betongen krymper under vinterhalvåret (höjden hos damm delen är ca. 15.8 m), dvs fogens spalt utvidgar sig skulle den extra tjockleken bli ca 2.6 mm totalt.

2.5.2 Försöksuppställning och utförande av funktionellt test

Figur 2.9–10 visar försöksuppställningen. Den består av en betongkropp med en halvcylindrisk urborrad kanal med diametern 100 mm. Framför ytan med den

urborrade kanalen placeras en plexiglasskiva med en distans om ca 2 mm för att utgöra en spalt mellan betongytan och plexiglasen. Ovanpå betongkroppen placeras en halvcirkulär behållare i rostfritt stål med en diameter av 250 mm och en höjd av 300 mm. I botten är ett koncentriskt halvcirkulärt hål med en diameter av 100 mm upptaget med en ca 40 mm lång manschett eller utloppsrör där bituminet från den uppfyllda behållaren passerar genom och sedan ner i kanalen och spalten.

Utförande av testet har gjorts enligt följande:

Behållarens utloppsrör har förseglats och bituminet har fyllts på i behållaren till en viss nivå. Därefter har försöksuppställningen och förseglad bitumenbehållare placerats i klimatrummet vid stipulerad försökstemperatur och acklimatiserats i minst 3 dygn.

Testet har startats med att rörförseglingen bryts och bitumenbehållaren placeras på betongkroppen så att behållarens utloppsrör ansluts till kanalen i betongkroppen. Tidtagning har påbörjats och nivåskillnaden mellan behållarens topp och bitumenytan registreras med en tumstock. Därefter har mätningar utförts varje tionde minut men efter ett tag övergått till 30 minuters intervall. För testerna vid den låga temperaturen övergick även tidsintervallet till 60 minuter. Mätningar har endast utförts under dagtid.



Figur 2.9. Betongblock med urborrad kanal och plexiglasskiva med en 2 mm spalt mot betongyrorna innanför plexiglasen.



Figur 2.10. Behållare med bitumen placerad på betongkroppen med plexiglas Vänster. Behållarens diameter är 250 mm och diameter för kanal 100 mm.

3 Resultat

3.1 ITERATIV PROCESS MELLAN VATTENFALL OCH VTI

Tidigt i projektet togs en kontakt med VTI eftersom de tidigare varit involverade i bitumen problematiken för vattenkraften applikation gällande dilatationsfogar med kanaler och spalter fyllda med bitumen. Överenskommelse att bitumen materialet, det gamla IB1500 skulle skickas till VTI för att de skulle utföra standardiserade tester lika de som utförts tidigare.

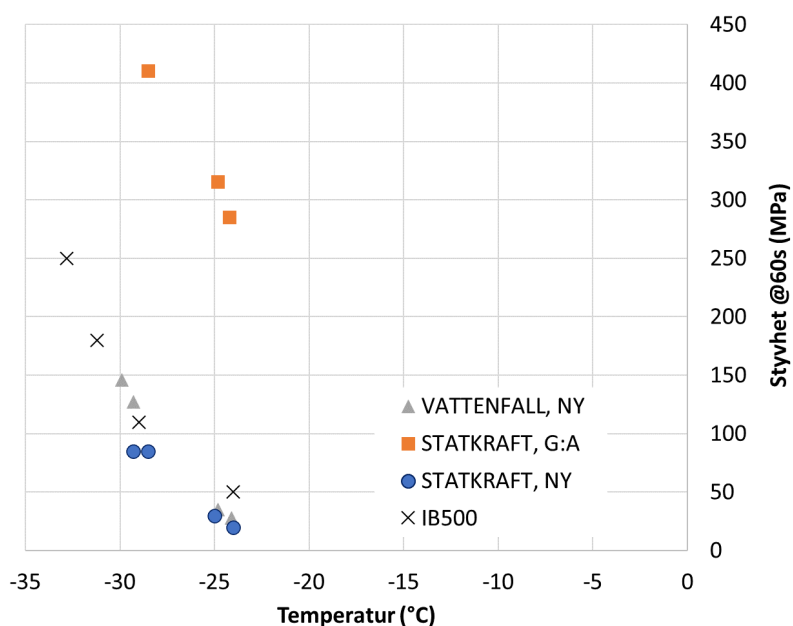
3.2 TIDIGARE RESULTAT FRÅN VTI (2008, 2019)

Tester har tidigare utförts hos VTI dels så har Vattenfall skickat prover 2008 men även 2019. Även Statkraft har utfört tester hos VTI på bitumen prover 2019. Testerna och resultaten från dessa provningar redovisas nedan.

Ett bitumenprov från de små fat med NYBIT8000 som används för påfyllning skickades till VTI för analys. Syftet var att kontrollera om dess egenskaper fortsatt uppfyller kravprofilen att likna det gamla IB1500 materialet och att det stämmer överens med den mix som definierades 2008.

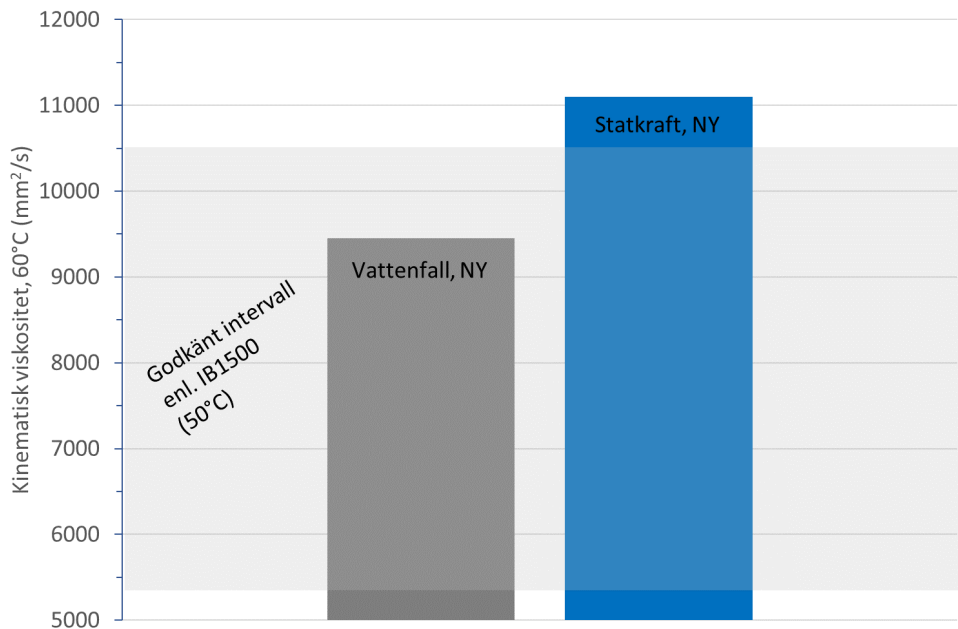
Provet som skickades till VTI 2019 analyserades med avseende på styvheten vid låga temperaturer i en böjbalksreometer enligt (SS-EN 14771, 2012), samt med avseende på kinematisk viskositet vid 60°C enligt (SS-EN 12595, 2014).

Resultaten från styvheten och kinematiska viskositeten redovisas i Figur 3.1 respektive Figur 3.2



Figur 3.1. Diagram med sammanställda data från tidigare tester. Från Nordström & Bryne 2020.

I Figur 3.1 ser man att styvheten hos den nya bitumen 2019 för både Vattenfall och Statkraft ligger väl samlat mellan 20–150 MPa. Använd gammal bitumen (åldrad, oxiderad) från Statkraft är betydligt styvare och ligger mellan 280–400 MPa. De färskas proverna ligger i bra paritet med den gamla kravprofilen för IB1500.



Figur 3.2. Sammanställning av uppmätta viskositet hos bitumen. Från Nordström & Bryne 2020.

Som framgår av Figur 3.2 uppmättes en kinematisk viskositet vid 60°C för Vattenfall och Statkraft till 9454 respektive 11097 mm²/s. Det använda bitumenmaterialet (NYBIT 8000) är en blandning av två produkter (V6000 och V 12000). Viskositetsdata från Nynäs säkerhetsdatablad för V 6000 och V 12000 anger en kinematisk viskositet motsvarande 4000–8000 mm²/s respektive 8000–16000 mm²/s. Enligt beräkningar med ekvation 9 kan blandningens förväntade viskositet beräknas:

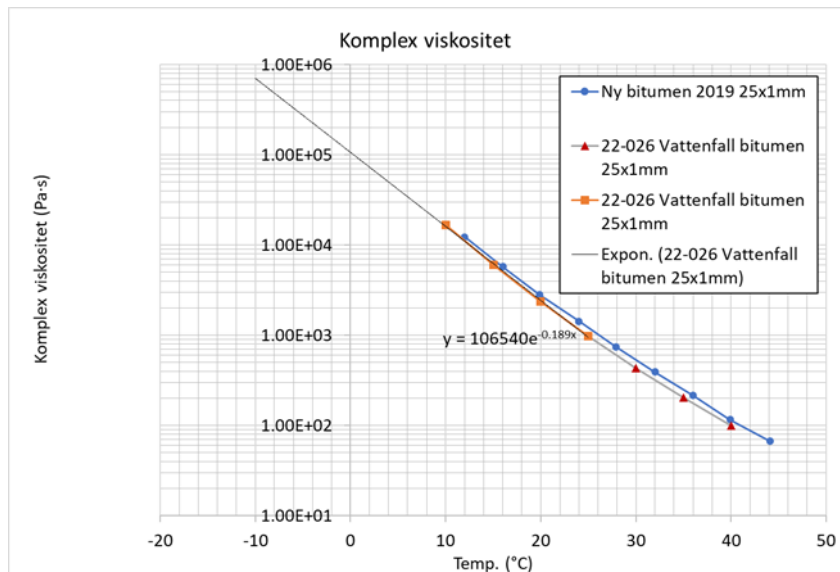
$$\eta_{mix} = \eta_A^\alpha \eta_B^{(1-\alpha)} \quad (9)$$

Med extremvärden angivna i säkerhetsdatabladet kan man förvänta sig en viskositet i spannet 5300–10550 mm²/s. De bitumenblandningar (NYBIT 8000) som testas ligger alltså i den högre delen av spannet och för Statkrafts del även över detta. Om kravprofilen är rätt så skulle Statkrafts bitumen kunna vara för trögflytande och riskera pluggbildning.

3.3 RESULTAT FRÅN NYA TESTER VID VTİ

3.3.1 IB1500

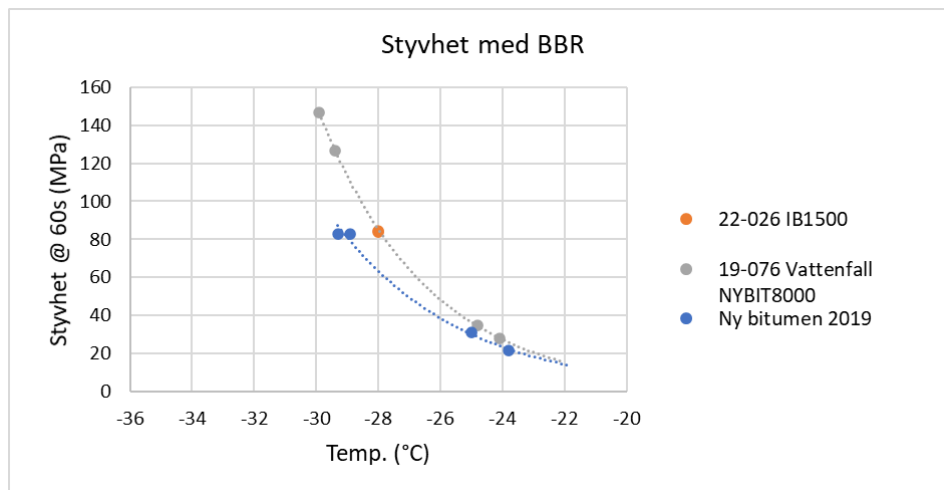
Den absoluta/dynamiska viskositeten hos IB1500 bestämdes med hjälp av en DSR (Dynamic Shear Rheometer) med 25 mm diameter hos mätplattorna. Resultaten jämfördes med tidigare testade produkter (2008 och 2019) och visas i Figur 3.3.



Figur 3.3. Komplex viskositet för IB1500. Extrapolerade värden för lägre temperaturer.

Det utfördes även en extrapolering av mätvärdena mot lägre temperaturer vilket även det visas i Figur 3.3.

Vidare undersöktes styvheten hos IB1500 vid låga temperaturer med en BBR (bending beam rheometer), se Figur 3.4 nedan.



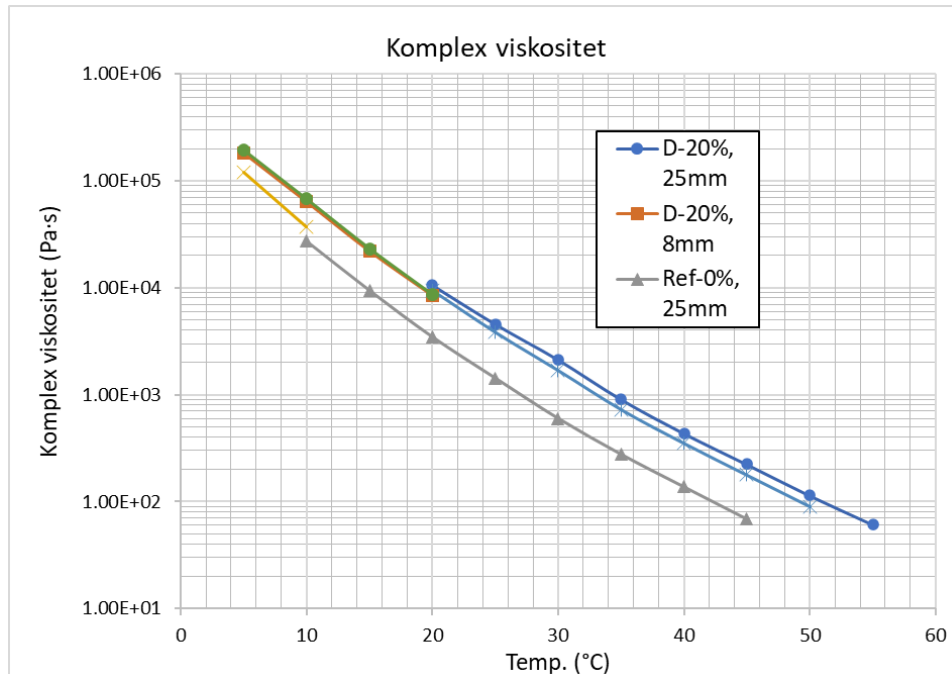
Figur 3.4. Styvhet hos IB1500 testat 2022 jämfört med NYBIT8000.

Den kinematiska viskositeten vid 60 °C för IB1500 uppmättes till 8452 mm²/s (+/- 6%).

3.3.2 Blandningar av bitumen och oxiderat bitumen

I avsaknad av leverantörer av oxiderat mjukbitumen som förhoppningsvis skulle ha en lägre temperaturkänslighet än standardprodukter av mjukbitumen för vägändamål så gjordes försök med att blanda ett viskositetsbitumen med ett oxiderat bitumen. Figuren 3.5 nedan visar på hur viskositeten varierar med temperaturen för viskositetsbituminet och två blandningar med ett oxiderat

bitumen – ett med 15% inblandning och ett med 20% inblandning av oxiderat bitumen.



Figur 3.5. Komplex viskositet för tester av olika blandningar med oxiderat bitumen.

Försöket slog inte väl ut eftersom endast en liten minskning av kurvans lutning åstadkoms med inblandning av det oxiderade bituminet. Viskositetskurvorna för blandningar är förskjutna i sidled i förhållande till varandra eftersom det oxiderade bituminet är hårdare än mjukbituminet. Vid viskositeten 100 Pas så är det tio graders skillnad mellan mjukbituminet och blandningen med 20% inblandning av oxiderat bitumen. Vid viskositeten 10 000 Pas så är det 5 graders skillnad mellan mjukbituminet och blandningen med 20% inblandning av oxiderat bitumen.

3.4 RESULTAT FRÅN FUNKTIONSTESTER VID VATTENFALL

3.4.1 Beskrivning av reologiskt förlopp

Det reologiska förloppet att fylla ut fogen ser i princip identiskt ut för de båda temperaturerna förutom att tiden för utfyllnad varierar stort vilket framgår av Figurerna 3.6 och 3.7. Förloppet kan även indelas i två faser: Fas I den inledande fasen då bitumen fyller upp kanalen och Fas II då kanalen är fylld och spalten fylls, se Figur 3.8.

Graferna i Figur 3.8 beskriver de två olika faserna: den första delen av kurvan som i princip är linjär där bitumen flödar ner i kanalen i betongen och även påbörjar fyllning av spalten nedanifrån. Fas II påbörjas egentligen redan under Fas I men spaltpåfyllningen sker mycket långsammare. I detalj ser hela fyllningsförloppet ut enligt följande:

Först har bituminet från behållaren ansamlats längst ner i kanalen, där det har byggt på från botten och vuxit uppåt i kanalen. Bituminet har succesivt fyllt ut kanalen och när tillräckligt med bitumen har ansamlats i kanalen har även spalten börjats att fyllas ut. Utfyllningen av spalten sker i princip med en linjär front med viss lutning. Vid +10 °C är kanalen fylld efter ca 110 min och sedan är spalten utfylld till ca 98% efter ca 420 min, se Figur 3.6. För 0 °C sker kanalens uppfyllnad vid ca 900 min, se Figur 3.8, och spalten är i princip fylld vid ca 5700 min. Bildserie för +10 respektive 0 °C visas i Figur 3.6–3.7. Bildserierna försöker fånga ungefärliga reologiska utseende och tiden som kopplar till det utseende för de två olika temperaturerna.

En viktig kommentar angående tidsvärdet 900 min är att det är skattat då detta inträffade under nattetid då ingen mätning utfördes. Figur 3.6, bilden i översta raden till höger visar förloppet vid 0 °C och tid 1290 min, det var den första mätningen på morgonen. Den sista mätningen dagen innan var 600 min och fram till den mätningen är kurvan tydligt linjär, se Figur 3.8.

Figur 3.8 visar hur mycket bitumen som har runnit ur behållaren för de två olika temperaturerna 0 och +10 °.

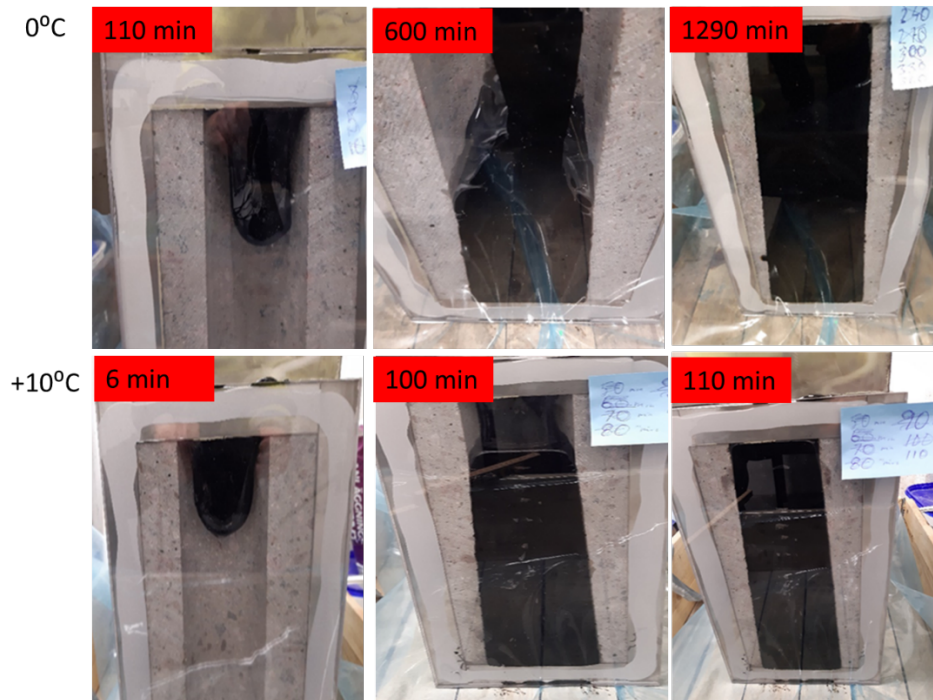
Nivåförändringen i behållaren är i princip linjär hos bitumen då kanalen fylls därefter minskar förändringen till ett minimum, vilket inte har kunnat mätas med tumstocken.

Bitumenmaterialet ansamlas i botten på kanalen när det rinner ut ur behållaren och börjar sedan fylla kanalen uppåt. Spalten börjar också att fyllas men mycket långsammare än kanalen. När kanalen är fylld sker materialtransport endast i spalten som försätts fyllas nedifrån och upp.

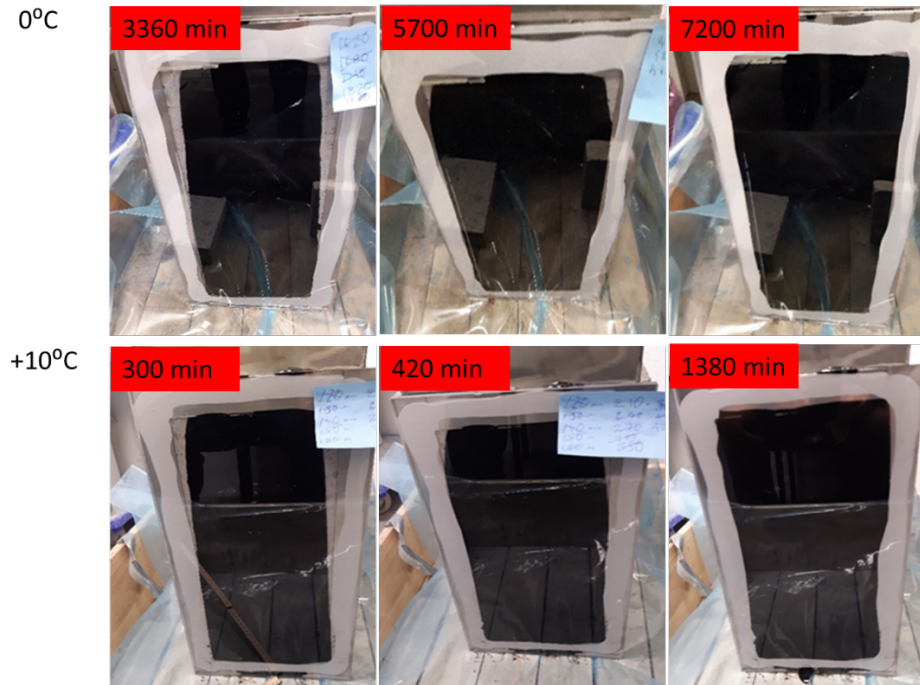
Det är egentligden hos bitumenmaterialet som blir den drivande kraften i den inledande fasen. Troligtvis är det i princip hydrostatiskt tryck under bitumenytan som stiger i kanalen som driver utfyllnaden av spalten. I början av processen finns ingen direkt fysisk koppling mellan behållaren och den stigande "bitumenpelare" i kanalen, det överförs ingen tryckande kraft vid själva påfyllningen av kanalen.

Däremot då kanalen är uppfylld kommer bitumenmaterialet i behållaren och i kanalen och spalten att vara sammankopplade.

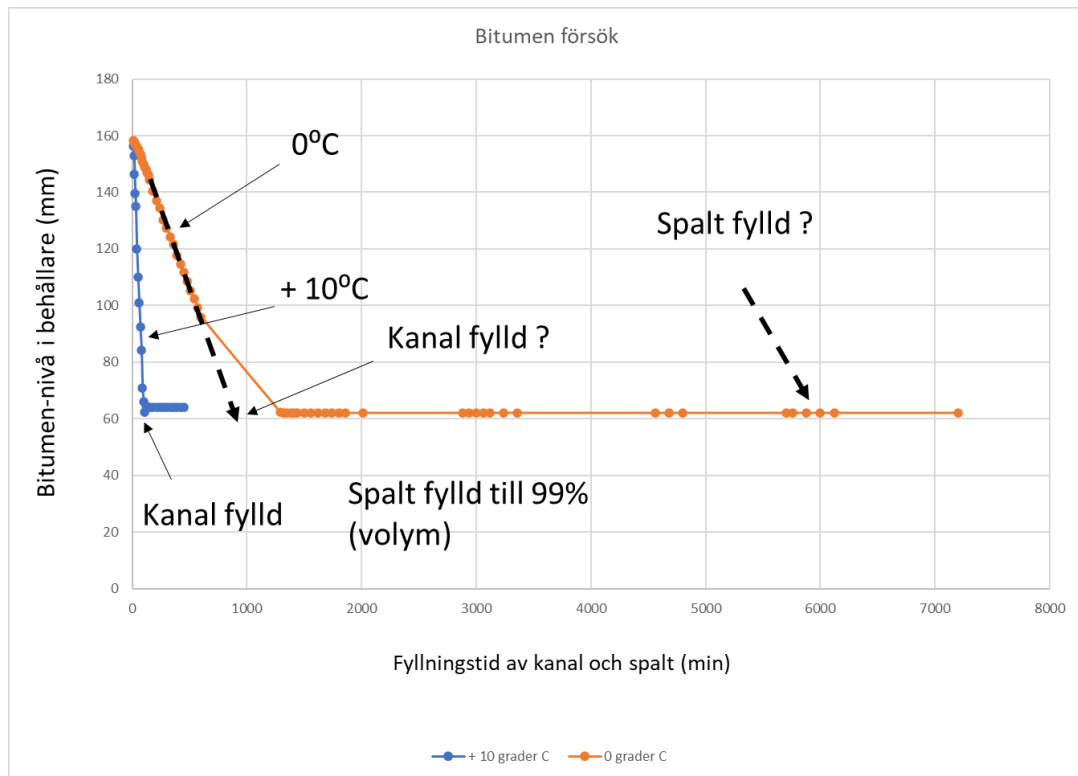
Läget i behållaren blir i princip stilla, nivån ändras inte, utan det är det jämviktsläge som har uppnåtts och i princip det eventuella hydrostatiska trycket under bitumenytan plus den del av behållaren (som nu i princip är konstant) som driver utfyllnaden av spalten.



Figur 3.6. Ungefärligt reologiskt förlopp för 0 respektive +10 grader och skillnaden i tid vid respektive liknande förlopp, Fas I, start till det att kanalen är fylld, ca 95% av totala volymen i kanal och spalt.



Figur 3.7. Ungefärligt reologiskt förlopp för 0 respektive +10 °C och skillnaden i tid vid liknande förlopp. Fas II, spaltens slutliga uppfyllning, ca 5% av totala volymen.

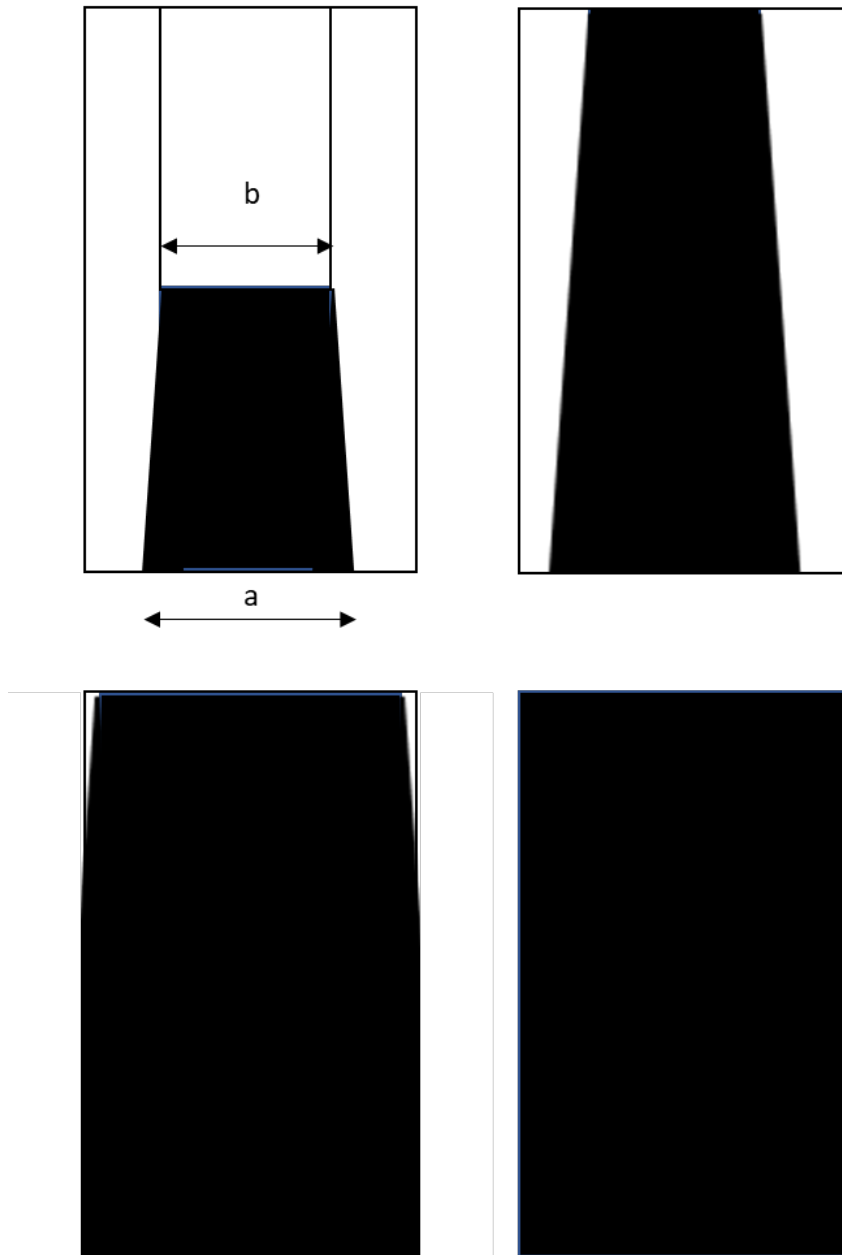


Figur 3.8. Nivåförändring av bitumen i behållare vid olika temperaturer

Viskositeten är troligtvis densamma i båda faserna för respektive temperatur, då den betraktas som en Newtonsk vätska, där viskositeten är oberoende av skjuvhastigheten.

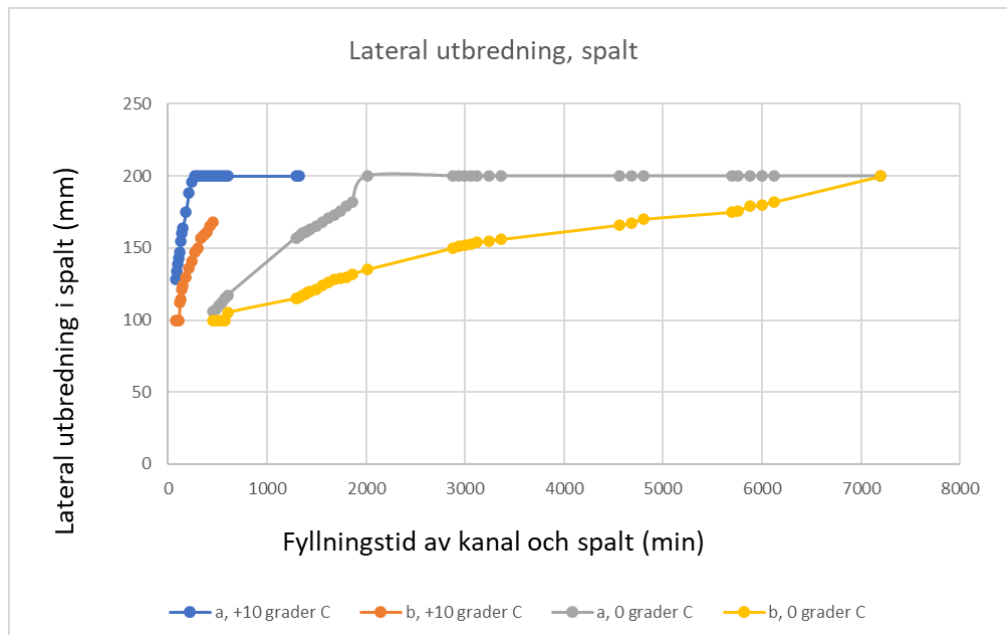
Om man gör en beräkning av hur mycket av volymen i kanal och spalt som fyllts ser man att då kanalen fylld till 100 % och endast en liten del av spalten är fylld har ca 95 % av den totala volymen av kanal och spalt fyllt, dvs under fas I. under fas II är det endast ca 5% av volymen som ska fyllas. Där måste man också ta med i beräkningen att det endast är en 2 mm spalt som ska fyllas. Den smala passagen har troligtvis en stor inverkan på flödet, flytförmågan hos bituminet jämfört med kanalens diameter.

Utfyllningen av spalten är ju det viktiga för att vattentäthet ska bevaras vid dimensionsförändringen över tid mellan sommar och vinter bitumenmaterialets flytförmåga vid lägre temperaturer. Eller rättare sagt materialets följsamhet vid betongens dimensionsförändring beroende av temperaturcykeln under året. Bitumenmaterialets förmåga att följa betongens rörelser eller betongens rörelser som ger upphov till spaltförändring i dilatationsfogen mellan monoliterna i dammen eller betongen strukturer i en kraftstation.



Figur 3.9. Schematisk bildserie över kanalens och spaltens uppfyllnad. Pilarna i övre vänstra bilden står för: a) lateral (botten) b) lateral (toppen). Vid fullständig uppfyllnad $a = b = 200$ mm.

Det reologiska förloppet för kanalen och spaltens utfyllnad visas schematiskt i Figur 3.9.



Figur 3.10. Lateral utbredning

Figur 3.10 visar hur den laterala utbredningen av botten respektive toppen av bitumen spalten utfylldes. De två graferna till vänster i diagrammet, botten (blå) och toppen (orange) är vid +10 °C. De två grafer till höger i diagrammet botten (grå) och toppen (gul) är vid 0 °C. Botten fylls först av naturliga skäl. Här blir det även tydligt hur långsam utfyllnadsprocessen i spalten är då serie 4, toppen (gul) tar långs tid att fylla.

3.4.2 Uppskattning av transport av bitumen i kanal och spalt

Fas I inledande del i diagram som uppvisar i princip linjärt beteende och avslutas då den halv cirkulära kanalen i betongkroppen är uppfylld men även den del av spalten som finns framför kanalens diameter, ca 100 mm brett. Fas II är den tid det tar att fylla ut resten av spalten, dvs de delar som ligger utanför den centralt belägna spalten. Beräkningsmässigt motsvarar det ca 5 % av volymen. Dock tar utfyllnaden mycket längre tid än den inledande fasen. Det är troligtvis två olika drivande krafter som styr hastigheterna i fas I respektive fas II.

Utifrån att bituminet antas bete sig som en Newtonsk vätska görs en enkel betraktelse av tidsförloppet vid försöken där vi antar att det är ett linjärt beteende. Utifrån värden i Figur 3.8 vid +10 C och 0 C, extrapoleras tidsvärden för -10 C.

Alla tider för de olika faserna i för respektive temperatur, uppmätta värden för +10 C och 0 C, extrapolerat för -10 C, visas i Tabell 3.1. beräkningarna redovisas i Bilaga A.

Tabell 3.1. Uppmätt och uppskattad tid för utfyllnadsförlopp av bitumen vid olika temperaturer.

	Fas I	Fas II	Total	Total
°C	tid (tim)	tid (tim)	tid (tim)	tid (dygn)
10	1.8	5.2	7	0.3
0	15	80	95	4.0
-10	123	1239	1362	57

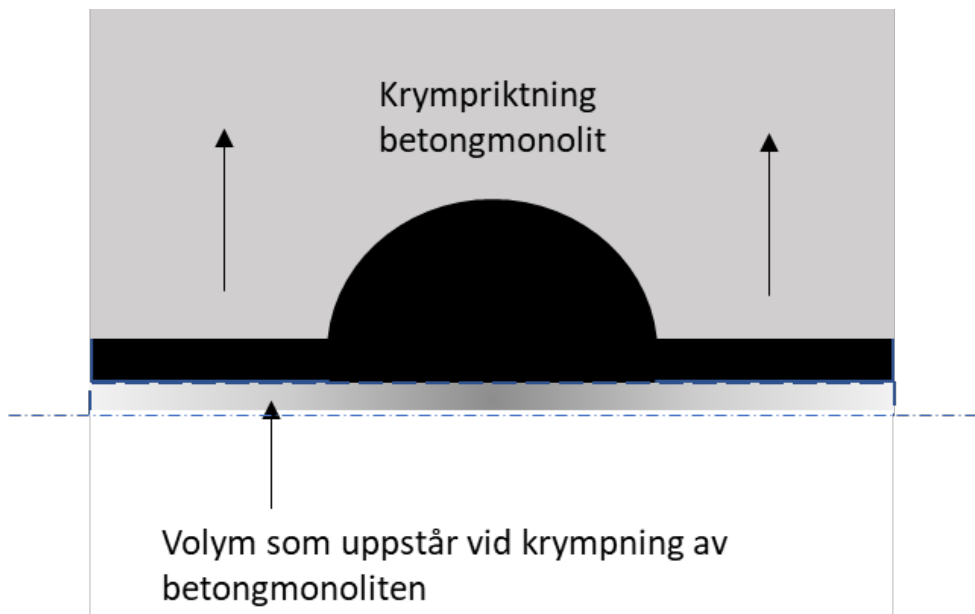
Den process som tar längst tid är den övre delen av spalten som utfylls sist i systemet. Detta troligtvis p.g.a. att där är det hydrostatiska trycket lägst då det är kortaste höjden upp till bitumenytan i behållaren, dvs en tänkt "bitumenpelare".

Genom att dela upp fyllningsprocessen i två faser där kanalen fylls först och därefter spalten. Detta är inte fallet då spalten börjar fyllas direkt när en bitumenpelare etablerats i kanalen men eftersom det är en så liten del av spalten som fyllts då kanalen är uppfylld, görs ändå det antagandet.

Genom att beräkna teoretiska värden för volymen av spalten och använda den uppmätta tiden för fas II, kan ett medelvärde för flödet av bitumen in i spalten beräknas. Beräkningarna redovisas i Bilaga A.

Fas II är det förlopp som blir kritiskt vid temperaturrelser.

Genom att göra en enkel uppskattning av tiden för fas II vid -10 °C tillsammans med informationen att en temperaturskillnad mellan 13 °C i betongen vid en omgivande temperatur av +25 °C och -7 °C vid en omgivningstemperatur av -25 °C ger en krympning av betongen med 2 mm, se schematisk bild i Figur 3.11. Tiden för detta förlopp får inte gå fortare än 102 dygn eller drygt 3 månader. Med de förhållanden som gäller för Sverige är scenariot högst osannolikt. Bitumenmaterialet kommer alltså att följa efter och fylla ut den spalt som bildas då temperaturen faller.



Figur 3.11. Volym i fog som uppstår vid krympning av betongmonolit som bituminet ska klara av att fylla ut vid -10°C .

Det korta perspektivet, om vintern kommer snabbt och en omgivande temperatur på -25°C verkar i mer än 14 dagar i sträck kan betongen krympa 1.1 mm vilket i vårt fall teoretiskt ge en volymförändringshastighet på $7.64 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ vilket ska jämföras med det volymflöde som var i Fas II vid -10°C $1.9 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$. Denna volymförändring skulle ge upphov till en total volymökning av $8.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$. I vårt fall skulle det innebära en ökning av spalten på 0.0001 m eller 0,1 mm. Beräkningar redovisas i Bilaga A. Om det fortfarande råder god adhesion mellan bituminet och monolitens betongyta skulle det medföra en töjning av bituminet om 5 %. Vilket i sammanhanget är en relativt kraftig töjning. Här skulle det vara intressant att se om bitumenmaterialet skulle spricka under den dragspänning som uppstår eller ej, den sk Fraass- punkten, d.v.s. den temperatur då materialet spricker vid en viss given dragspänning.

4 Diskussion

Den kinematiska viskositeten för IB1500 uppmätt 2022 var 8452 mm²/s vid 60 °C. De tidigare uppmätta värdena från 2019 för kinematisk viskositeten var för NYBIT8000 9454 respektive 11097 mm²/s.

Även styvheten mättes på IB1500 och hade samma styvhet som NYBIT8000 vid låga temperaturer. Resultatet visar att IB1500 har samma styvhet som NYBIT8000 vid låga temperaturer.

Försöken med det oxiderade bituminet gav inte de resultat vi önskat så skillnaderna inte blev tillräckligt stora, se Figur 3.5. Viskositetskurvorna för blandningar är förskjutna i sidled i förhållande till varandra eftersom det oxiderade bituminet är hårdare än mjukbituminet. Vid viskositeten 100 Pas så är det tio graders skillnad mellan mjukbituminet och blandningen med 20% inblandning av oxiderat bitumen. Vid viskositeten 10 000 Pas så är det 5 graders skillnad mellan mjukbituminet och blandningen med 20% inblandning av oxiderat bitumen. Viskositeten är alltså lite högre vid för blandningen, vilket kan vara bra vid högre temperaturer i konstruktionen. Då skulle materialet kanske läcka mindre i uppvärmda delar av en kraftverksdamm.

Dock är det sämre vid låga temperaturer då det blir stelare, men det behöver inte vara ett problem om viskositeten vid lägre temperaturer ger en tillräcklig rörelse hos bitumenmaterialet.

Funktionstesterna har visat att den reologiska processen är ungefär densamma vid +10 °C som vid 0 °C, dock tar förloppet längre tid vid den lägre temperaturen, systemets belastning är ju densamma. Hänsyn måste tas till de geometriska skillnaderna mellan kanalströmningen och strömningen i den smala spalten. Adhesionen mot betongytan kommer troligtvis att ha en större hindrande effekt av flödet i spalten jämfört med flödet i kanalen.

Den uppskattade tiden för utfyllnadsförloppet av bituminet vid -10 °C tillsammans med beräkningarna av en spaltutvidgning vid krympning av betongen är intressant. De båda scenariona, dels att en väldigt snabb avkylning av en damm, 14 dygn, men även att det ska ta kortare tid än 102 dygn mellan sommar och vinter är osannolika. Man måste dock ha i minnet att mot lägre temperaturer kan bitumen frångå beteendet som en Newtonsvätska i vårt fall och blir mer elastiskt vilket medför en ännu långsammare reologisk process.

Bitumen uppvisar en mycket god adhesion mot de flesta material framför allt olika former av stenmaterial, vanlig asfalt är ett bra exempel på det. Troligtvis är även adhesionen mot betong god. Detta är också temperaturberoende, det skulle vara intressant att utföra någon form av adhesionstest med varierande temperatur.

Vid temperaturer under -10-15 °C har bitumen sin sk Fraas temperatur, vilken är den temperatur då bituminet spricker vid en viss dragbelastning. Detta kan ju vara ett scenario där bituminet dras ut då betongen i monoliterna krymper vid låga temperaturer under vintern samtidigt som bituminet även blir sprött och kanske till och med spricker. Det kan ju även vara så att om adhesionen blir sämre vid

lägre temperaturer så kan ju ett adhesionsbrott inträffa före ett eventuellt sprödbrott i bituminet.

Adhesionen mellan betongen och bituminet har så klart också en mycket viktig funktion för att det ska vara tätt mot vatten. Om den kraft som vattnets hydrostatiska tryck ger överstiger adhesionen mellan bitumen och betong, riskerar ett läckage att uppstå.

Enligt Xu et al, (2018) uppvisar bitumen och en mineralballasts kontaktyta adhesions- och kohesionsbrottsmoder vid extremt låga temperaturer, lägre än -15 °C. Vid -5 °C till -15°C ökar dragspänningen hos gränsskiktet för att sedan, abrupt minska vid -15 °C. Vid temperaturer ned till -15 °C borde bitumenskiktet i dilatationsfogen kunna hålla tätt.

Informationen från ritning i Figur 2.8 om behållaren med höst respektive vår nivåer måste ha med hur bituminet transporteras i spalten under en temperaturcykel. Det ska vara högnivå under hösten. Lågnivå fick inte understiga en viss lägsta nivå. Skillnaden mellan dessa nivåer kan vara det som läcker ur fogen under temperaturcykeln. När betongmonoliten kyls ned under vintern krymper betongen och spalten blir större. Då är det önskvärt att bitumenmassan fyller ut den större spaltvidden som uppstår. Var tar då bituminet vägen då spalten pressas ihop? Troligtvis försvinner en del i skarvar mellan betongen och fogbandet eller i sprickor och kanske en del penetrerar in i betongens porer. Det kan även vara så att bituminet pressas tillbaka till behållaren. Dock har inte alla rörelsefogar systemet med en behållare utan endast ett påfyllningsrör.

Ett försök att uppskatta viskositeten vid -10 °C genom att använda sig av Poiseulles lag och därefter WLF-ekvationen har utförts. Dock har resultaten visat en alldeles för stor spridning och kommer inte att redovisas i denna rapport. Vår försöksupställning med både strömning i både spalt och rörformad kanal eller halvkanal kräver nog en mer utförlig teoretisk betraktelse. Däremot finns en stor potential för ett mer teoretiskt modellerande om ett nytt mer miljövänligt bitumenalternativ skall utvecklas.

5 Slutsats och framtida arbete

Vid temperaturer ner mot $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ är det mycket troligt att bitumenmaterialet i en dilatationsfog uppvisar tillräcklig viskositet för att utfylla den volymförändring som uppstår vid en övergång från sommar till vinter under normala förhållanden.

Funktionstesterna gav värdefull kunskap om bituminets beteende vid strömning i olika geometrier. Det reologiska beteendet för bitumen i försöksuppställningen för funktionstest är i princip lika för temperaturerna $+10$ respektive $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dock är tidsförloppet betydligt längre vid $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ än vid $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tidsförloppet för utfyllnad av kanal och spalt vid de olika temperaturerna kan sammanfattas med att vid $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ är det fråga om timmar, vid $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ några dagar och vid $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ några veckor upp till några månader.

Standardiserade tester med modifierat oxiderat mjukbitumen gav ett något högre värde för viskositeten vid högre temperaturer. Om det räcker för att hindra läckage i en uppvärmd del av en anläggning är svårt att bedöma.

Funktionstester vid högre temperaturer t.ex. $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ har inte utförts. För att definiera lämpliga gränsvärden för viskositeten hos bitumen vid höga temperaturer är det nog att föredra en mer omfattande teoretisk studie av de reologiska egenskaperna hos materialet. Teoretiska modeller kan ju valideras mot funktionstesterna.

Adhesionstester och eventuellt framtagande Fraass-punkten vid låga temperaturer kan vara intressant att utföra.

De efterforskningar som hittills gjorts har inte gett något lämpligt biobaserat alternativ och kan möjligen studeras vidare.

6 Referenslista

- Apostoloidis, P., L., Vansteenkiste, S., Chailleux, E. (2021). Glass transitions in bituminous binders. *Materials and Structures* (2021) 54:132.
- Chehab, G.R., Kim, Y.R., Schapery, R.A., Witczak, M.W. Bonaquist, R. (2002). Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state. Conference paper in *Asphalt paving Technology: association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings of the technical sessions, January 2002.*
- Chen, H., Barbieri, D.M., Zhang, X. Hoff, I. (2022). Reliability of calculation of Dynamic modulus for Asphalt Mixtures using Different Master Curve Models and Shift Factor Equations. *Materials*, 2022, 15, 4325.
- Enzell, J., Tollsten, M. (2017). Thermal cracking of a concrete arch dam due to seasonal temperature variations. TRITA-BKN Master Thesis 515, 2017.
- Gaudenzi, E., F. Cardone, X. Lu, F. Canestrari. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Construction and Building Materials*. Volume 362, 129773.
- Imeri, L. och Maka, N. (2021). Lignin i bindemedel för hållbara asfaltbeläggningar – Reologiska undersökningar. Thesis 361, LTH, Institutionen för teknik och samhälle, Trafik och väg. CODEN: LUTVDG/(TVTT-5328)/1-100/2021, ISSN 1653-1922.
- Ingrassiaa, L., P., X. Lu, G. Ferrottia, F. Canestrari. (2019). Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 144, pp 209–222.
- Lerjefors, E. och Wittboldt. (2021). Kartläggning av biobitumen i världen - Ett steg närmare en hållbar infrastruktur. Thesis 360, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle, Trafik och väg. CODEN: LUTVDG/(TVTT-5327)/1–129/2021, ISSN 1653-1922.
- Löfqvist, B. (1946). Temperatureffekter i hårdnande betong: Undersökning av några faktorer som påverkar sprickbildningen i grövre konstruktioner – Jämförelse mellan två svenska cement. Kungliga Vattenfallsstyrelsen.
- Nordström och Bryne. (2020). Pengfors – bitumenläckage. Förslag på åtgärder. VRD-R52:2020, Vattenfall AB, R&D, Älvkarleby, Sverige.
- Pstrowska, K., Gunka, V., Sidun, I., demchuk, Y., Vytrykush, N., Kułazyński, M., Bratychak, M. (2022). Adhesion in Bitumen/Aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. *Coatings* 2022, 12, 1934.
- SS-EN 12593:2015. (2015). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av brytpunkt enligt Fraass. Stockholm: SIS.
- SS-EN 14771:2005. (2005). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av kryptstyvhet – Böjbalkreometer (BBR). Stockholm: SIS.

SS-EN 14771:2012. (2012). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av kryptstyvhet – Böjbalkreometer (BBR). Stockholm: SIS.

SS-EN 12596:2007. (2007). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av dynamisk viskositet med vakuumkapillärviskosimeter. Stockholm: SIS.

SS-EN 12595:2014. (2014). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av kinematisk viskositet. Stockholm: SIS.

SS-EN 14770:2012. (2012). Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av komplex skjuvmodul och fasvinkel – Dynamisk skjuvreometer (DSR). Stockholm: SIS.

Thorsell, P-E. (2004). Fogar och fogreparationer. Stockholm: Elforsk rapport nr. 2004:23.

Xu, Y., Zheng, C., Feng, Y., Guo, X. (2018). Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis. Construction and Building materials, 183 (2018) pp. 95-101.

Zhu, J., Ahmed, A., Dinegdae, Y. (2021). Bitumen properties and the shear resistance of asphalt mixtures - Towards a tool for bitumen selection. VTI rapport 1084A.

EGENSKAPSKRAV PÅ BITUMEN- MASSA TILL DILATATIONSFOGAR

Bitumenmassa används ofta som en av tre barriärer i dilatationsfogar på betongdammar. De övriga två utgörs av fogband av koppar, rostfri plåt eller PVC. Historiskt har en del olika bitumenmassor använts även om den tidigare benämnda bitumensorten IB1500 (Industri Bitumen) blev den vanligaste och som användes av många anläggningsägare.

Någon egentlig utredning om vilka lämpliga egenskaper bitumenmassan ska ha för att vara tillräckligt följsam när fogen rör sig, och kunna transporteras från påfyllningsställe långt ner i konstruktionen, verkar inte finnas. Om ett miljövänligare material skulle användas för att ersätta bitumen behöver också egenskapskraven definieras.

Målet med projektet är att definiera lämpliga egenskapskrav på fyllnadsmaterialet i rörelsefogar för olika användningsområden. Syftet är att underlätta inköp av fyllnadsmaterial med rätt kvalitet oavsett om det är bitumen eller något annat material.

Vid temperaturer ner mot -10°C är det mycket troligt att bitumenmaterialet i en dilatationsfog uppvisar tillräcklig viskositet för att utfylla den volymförändring som uppstår vid en övergång från sommar till vinter under normala förhållanden. Funktionstesterna gav värdefull kunskap om bituminets beteende vid strömning i olika geometrier. Det reologiska beteendet för bitumen i försöksupställningen för funktionstest är i princip lika för temperaturerna $+10^{\circ}\text{C}$ respektive 0°C . Dock är tidsförloppet betydligt längre vid 0°C än vid $+10^{\circ}\text{C}$.

Tidsförloppet för utfyllnad av kanal och spalt vid de olika temperaturerna kan sammanfattas med att vid $+10^{\circ}\text{C}$ är det fråga om timmar, vid 0°C några dagar och vid -10°C några veckor upp till någon månad.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.