



UPPSALA  
UNIVERSITET

W14019

Examensarbete 30 hp  
Juni 2014

# Nedbrytning av propylenglykol i uppsamlingsystem för avisningsvätskor

En studie utförd vid Stockholm Arlanda flygplats

---

Erik Forsberg



## REFERAT

### Nedbrytning av propylenglykol i uppsamlingsystem för avisningsvätskor - En studie utförd vid Stockholm Arlanda flygplats

*Erik Forsberg*

Avisningsvätskor baserade av propylenglykol används på Stockholm Arlanda flygplats för att avlägsna och förebygga isbildning på flygplan. Propylenglykols höga syreförbrukning kan orsaka syrebrist i vattendrag nedströms flygplatsen om den inte omhändertas. Massbalanser av använd och uppsamlad mängd propylenglykol utförda av Swedavia visar att den beräknade andelen uppsamlad glykol troligtvis är en underskattning av den faktiska mängden uppsamlad glykol. Misstankar att propylenglykol bryts ned i dagvattensystemet designat för uppsamling av avisningsvätskor, benämnt B-glykolsystemet, behöver utredas för att utesluta att propylenglykol lämnar B-glykolsystemet på andra sätt.

Syftet med denna studie har varit att fastställa om det sker en nedbrytning av propylenglykol i B-glykolsystemet samt att uppskatta nedbrytningens omfattning. För att ta reda på om det sker någon nedbrytning har tre pumpbrunnar i B-glykolsystemet studerats. Temperatur- och syremätningar samt stickprovtagning för analys av nedbrytningsprodukter utfördes i dessa brunnar. Ett nedbrytningsförsök utfördes i laboratorium. Ackumuleringstider för vattnet sammanställdes utifrån vattennivådata i pumpbrunnarna, som därefter användes i en beräkningsmodell för att uppskatta nedbrytningens omfattning.

Analysresultaten visade att nedbrytningsprodukten n-propanol fanns i B-glykolsystemet även vid årets kallaste månader vilket starkt indikerar att en nedbrytning äger rum. Låga syrehalter uppmättes. Ett antal visuella indikationer iaktogs såsom biofilmer på pumpbrunnars väggar. Resultaten från nedbrytningsförsöket visade på reducerande TOC- och syrehalt. Den totala nedbrytningen av propylenglykol, i den del av B-glykolsystemet som har studerats, uppskattades genom beräkningsmodellen till 1 - 2,5 promille av den totala använda mängden propylenglykol vid Stockholm Arlanda flygplats.

Det kan med stor säkerhet fastställas att aerob nedbrytning av propylenglykol äger rum i B-glykolsystemet och att detta även kan ske under avisningssperiodens kallaste månader. Beräkningsmodellen ger en indikation på storleksordningen av nedbrytningen i den del av B-glykolsystemet som studerats. Men inga konkreta slutsatser rörande nedbrytningens omfattning kan dras på grund av beräkningsmodellens många antaganden.

**Nyckelord:** Nedbrytning, propylenglykol, avisningsvätska, pumpbrunnar, dagvatten, Stockholm Arlanda flygplats. *Institutionen för Geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet. Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala*

## ABSTRACT

### **Degradation of Propylene glycol in a stormwatersystem designed to collect deicingfluids**

*Erik Forsberg*

Deicing fluids based on Propylene glycol are used at Stockholm Arlanda airport to remove or prevent ice on aircrafts. The high oxygen demand of propylene glycol can cause oxygen depletion in rivers downstream from the airport if not collected. Mass balance calculations made by Swedavia indicate that the actual amount of gathered propylene glycol is underestimated. Suspicions that propylene glycol is degraded in the stormwatersystem designed to collect deicingfluids, called the B-glycolsystem, have to be investigated in order to establish with certainty that no propylene glycol in other ways leaves the B-glycol system.

The purpose of this study was to determine if degradation of propylene glycol is present in the B-glycol system and also to estimate the extent of the degradation. Propylene glycols high biological oxygen demand can cause oxygen depletion in waters downstream from Stockholm Arlanda airport if not collected. To investigate if degradation is present, three collection tanks in the B-glycolsystem were studied. Temperature and oxygen measurements were performed and samples were collected for analysis of degradation products. A degradation experiment was performed in laboratory and the accumulation times for water in the collection tanks were compiled from surface level data. These accumulation times were later used in a computational model to estimate the extent of the degradation.

The results from the analysis showed that the degradation product n-propanol was present in the B-glycolsystem even in the coldest months which indicates that degradation of propylene glycol occurs in the system. Low oxygen levels were measured and a number of visual indicators were observed such as biological growth on the walls of the wells. The results from the degradation experiment showed decreasing TOC- and oxygen levels. The total degradation of propylene glycol was estimated by the computational model to be 1 – 2.5 parts per thousand of the total usage of propylene glycol at Stockholm Arlanda airport. It can be concluded that aerobic degradation of propylene glycol occurs in the B-glycolsystem even during the coldest months of the deicing period. The computational model gives an indication of the magnitude of the degradation in the parts of the B-glycolsystem that was studied. However, no concrete conclusions regarding the extent of the degradation can be drawn due to the many assumptions made in the calculations with the model.

**Keywords:** Degradation, propylene glycol, deicing fluids, stormwater system, Stockholm Arlanda airport

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala University. Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala*

## FÖRORD

Detta examensarbete på 30 högskolepoäng är utfört inom civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet. Arbetet är utfört vid Arlanda flygplats i samarbete med Swedavia AB där Ebba Waernbaum, VA-ingenjör vid Swedavia AB, har varit handledare. Roger Herbert, universitetslektor vid Institutionen för Geovetenskaper vid Uppsala Universitet, har varit ämnesgranskare.

Ett stort tack till min handledare Ebba Waernbaum och min ämnesgranskare Roger Herbert för all hjälp under studien. Ett extra stort tack till Ebba Warnbaum för allt stöd under arbetet och ditt brinnande engagemang.

Tack även till Björn Johansson, Stefan Bern, Henrik Fredriksson och Paul Hedlund vid Swedavia för erat engagemang och hjälp under arbetet. Tack också till Mats Medelberg på Moose Aviation, Kristin Carlsson på ALcontrol och Holger Torstensson på Provab.

Slutligen vill jag tacka min familj och mina vänner för allt stöd och all inspiration ni givit mig under våren.

Erik Forsberg  
Maj 2014, Uppsala

Copyright © Erik Forsberg och Institutionen för Geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet.  
UPTEC W14 019, ISSN 1401-5765  
Digitalt publicerad vid Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet.  
Uppsala 2014

# POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

## Nedbrytning av propylenglykol i uppsamlingssystem för avisningsvätskor - En studie utförd vid Stockholm Arlanda flygplats

*Erik Forsberg*

Den 13 januari 1982 omkom 78 personer då Air Florida flight 90 störtade endast tre kilometer från Vita huset i Washington, D.C. Ett kraftigt snöfall hade orsakat förseningar på flygplatsen, och vid gaten hade is avlägsnats från planet. Efter avisningen fick Flight 90 dock vänta ytterligare 45 minuter och för att inte försena flighten bestämde kaptenen tillsammans med andrepiloten att ingen ytterligare avisning av planet behövdes. Vid start hade så mycket is bildats på flygplanets vingar att det endast lyfte ett par hundra meter ovan mark och 30 sekunder senare störtade ned i 14th Street-bron över Potomacfloden.

För att förhindra att olyckor som denna sker används varje år hundratusentals ton avisningsvätskor världen över för att avlägsna is eller förebygga isbildning på flygplan. Avisningsvätskorna vid Stockholm Arlanda flygplats är baserade på propylenglykol då det effektivt sänker vattnets fryspunkt så att is inte bildas på vingar och viktiga instrument. Propylenglykol är ofarligt för oss människor och används förutom i avisningsvätskor även i många livsmedel och tobaksvaror som fuktighetsbevarande medel.

Problemet är dock att molekylerna kräver mycket syre för att brytas ned vilket kan göra att vattendrag nedströms flygplatsen kan bli näst intill syrefria om propylenglykolen inte omhändetas. Vattenlevande organismer som är helt beroende av syre för sin överlevnad kan då dö ut.

För att se till att all propylenglykol samlas upp på Arlanda finns ett separat dagvattensystem, benämnt B-glykolsystemet, dit vatten ansamlas från de platser där avisning sker. Förutom detta suger man även upp använd avisningsvätska med vakumsugfordon. Beräkningsmässiga massbalanser av använd och uppsamlad mängd propylenglykol utförda av Swedavia visar att den beräknade andelen uppsamlad glykol troligtvis är en underskattning av den faktiska mängden uppsamlad glykol.

Misstankar finns om att detta beror på att det sker en nedbrytning av propylenglykol i glykoluppsamlingssystemet. Nedbrytningen av propylenglykol behöver därför utredas för att utesluta att propylenglykol lämnar B-glykolsystemet på andra sätt.

Glykol bryts ned genom att mikroorganismer använder molekylerna som kolkälla. Förutom kol behöver mikroorganismerna även näringsämnen och syre för att föröka sig. När nedbrytning av glykol äger rum bildas även restprodukter.

För att ta reda på om det sker en nedbrytning och även försöka uppskatta dess omfattning studerades tre pumpbrunnar i dagvattensystemet. I pumpbrunnarna mättes temperatur, syrehalt, vattnets ackumuleringstid, glykol och restprodukter som uppstår

vid nedbrytning. Ett nedbrytningsexperiment i lab genomfördes för att studera hur snabbt glykolen bröts ned och en beräkningsmodell skapades för att uppskatta hur mycket glykol som kan tänkas brytas ned.

Resultaten visade att nedbrytningsprodukter fanns i vattnet i B-glykolsystemet även vid årets kallaste månader vilket starkt indikerar att en nedbrytning äger rum. Låga syrehalter uppmättes och biologisk tillväxt hittades på brunnarnas väggar vilket även de tyder på att nedbrytning äger rum i brunnen. Resultaten från nedbrytningsförsöket visade på sjunkande kol- och syrehalter under den fjortondagarsperiod som studerades.

Den totala nedbrytningen av glykol i de delar av B-glykolsystemet som studerats närmre uppskattades genom beräkningsmodellen till 1 - 2,5 promille av den totala använda mängden glykol vid Stockholm Arlanda flygplats. Det är dock viktigt att poängtera att detta bara är en av få platser där nedbrytning kan äga rum.

Det kan med stor säkerhet fastställas att aerob nedbrytning av glykol äger rum i B-glykolsystemet och att detta kan ske även under avisningsperiodens kallaste månader. Beräkningsmodellen ger en indikation på storleksordningen av nedbrytningen i de studerade delarna av B-glykolsystemet, men inga konkreta slutsatser rörande nedbrytningens omfattning kan dras på grund av beräkningsmodellens många antaganden.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | INLEDNING .....   | 1  |
| 1.1   | SYFTE .....   | 1  |
| 1.1.1 | Frågeställningar .....  | 2  |
| 1.2   | AVGRÄNSNINGAR .....   | 2  |
| 1.3   | TILLVÄGAGÅNGSÄTT .....  | 2  |
| 2.    | BAKGRUND: AVISNING OCH UPPSAMLING .....                             | 4  |
| 2.1   | ISBILDNING .....  | 4  |
| 2.2   | AVISNING.....   | 4  |
| 2.2.1 | Avisningsfordon .....   | 4  |
| 2.3   | AVISNINGSVÄTSKOR.....   | 5  |
| 2.3.1 | Typ I: Safewing® MP I ECO PLUS (80).....                            | 5  |
| 2.3.2 | Typ II: Safewing® MP II FLIGHT .....                                | 5  |
| 2.4   | UPPSAMLING AV AVISNINGSVÄTSKOR .....                                | 6  |
| 2.4.1 | A-glykol.....   | 6  |
| 2.4.2 | Uppsamlingsfordon .....   | 6  |
| 2.4.3 | B-glykol.....   | 7  |
| 2.5   | AVISNINGSVÄTSKORNAS FLÖDE PÅ ARLANDA .....                          | 7  |
| 2.6   | GLYKOL.....   | 8  |
| 2.6.1 | Propylenglykol.....   | 8  |
| 3.    | BAKGRUND: NEDBRYTNING AV GLYKOL .....                               | 9  |
| 3.1   | NEDBRYTNING .....   | 9  |
| 3.1.1 | Aerob nedbrytning.....  | 9  |
| 3.1.2 | Anaerob nedbrytning .....   | 9  |
| 3.1.3 | Intermediat och nedbrytningsprodukter vid anaerob nedbrytning ..... | 10 |
| 3.2   | FAKTORER SOM PÅVERKAR NEDBRYTNINGSPROCESSEN .....                   | 10 |
| 3.2.1 | Temperatur.....   | 11 |
| 3.2.2 | Mikroorganismer .....   | 11 |
| 3.2.3 | Syre.....   | 12 |
| 3.3   | NEDBRYTNINGSHASTIGHET.....  | 12 |
| 3.4   | INDIKATORER FÖR NEDBRYTNING .....                                   | 13 |
| 4.    | METOD .....   | 14 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1   | PLATSBESKRIVNING .....                                | 14 |
| 4.1.1 | Pumpbrunn GB05 .....                                  | 15 |
| 4.1.2 | Fördröjningsmagasin och pumpbrunn GB09 .....          | 16 |
| 4.1.3 | Pumpbrunn GB11 .....                                  | 16 |
| 4.1.4 | Ledningssystemet .....                                | 16 |
| 4.2   | PROVTAGNING .....                                     | 16 |
| 4.3   | MÄTNINGAR I FÄLT .....                                | 17 |
| 4.3.1 | Temperatur.....                                       | 17 |
| 4.3.2 | Syrehalt.....   | 17 |
| 4.4   | ANALYSER.....   | 17 |
| 4.4.1 | N-propanol.....                                       | 17 |
| 4.4.2 | Avisningsvätskans kemiska sammansättning.....         | 17 |
| 4.4.3 | TOC mätning med kyvettmetod .....                     | 18 |
| 4.5   | NEDBRYTNINGSFÖRSÖK .....                              | 18 |
| 4.5.1 | Utförande .....                                       | 18 |
| 4.5.2 | Analyser.....   | 19 |
| 4.6   | VATTNETS ACKUMULERINGSTID I PUMPBRUNNAR .....         | 20 |
| 4.7   | BERÄKNINGSMODELL FÖR NEDBRYTNING .....                | 20 |
| 4.7.1 | Beräkningar för kontinuerligt stigande vatten.....    | 21 |
| 4.7.2 | Beräkningar för kategorin flack ackumuleringstid..... | 21 |
| 4.7.3 | Sammanställning. ....                                 | 21 |
| 5.    | RESULTAT.....   | 23 |
| 5.1   | TEMPERATUR, SYRE OCH VISUELLA INDIKATIONER .....      | 23 |
| 5.2   | ANALYSER.....   | 25 |
| 5.2.1 | Propylenglykol, n-propanol och TOC .....              | 25 |
| 5.2.2 | Avisningsvätskans kemiska sammansättning.....         | 27 |
| 5.2.3 | TOC-mätning med kyvettmetod.....                      | 28 |
| 5.3   | NEDBRYTNINGSFÖRSÖK .....                              | 28 |
| 5.3.1 | Propylenglykol.....                                   | 28 |
| 5.3.2 | TOC .....   | 31 |
| 5.3.3 | Syrehalt.....   | 32 |
| 5.3.4 | Fosfor och kväve .....                                | 33 |
| 5.4   | ACKUMULERINGSTIDER I PUMPGROPAR .....                 | 33 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.5   | UPPSKATTNING AV NEDBRYTNING I B-GLYKOLSYSTEMET .....     | 34 |
| 6.    | DISKUSSION .....   | 36 |
| 6.1   | SKER DET EN NEDBRYTNING AV GLYKOL I B-GLYKOLSYSTEMET? 36 |    |
| 6.1.1 | N-propanol.....  | 36 |
| 6.1.2 | Temperatur.....  | 36 |
| 6.1.3 | Syrehalt i pumpbrunnarna .....                           | 36 |
| 6.1.4 | Visuella indikationer.....                               | 37 |
| 6.1.5 | Avisningsvätskans kemiska innehåll .....                 | 37 |
| 6.1.6 | Nedbrytningsförsök .....                                 | 37 |
| 6.2   | HUR STOR ÄR NEDBRYTNINGEN? .....                         | 39 |
| 6.2.1 | Beräkningsmodell.....                                    | 39 |
| 6.3   | FÖRSLAG TILL VIDARE STUDIER .....                        | 40 |
| 7.    | SLUTSATSER .....   | 41 |
| 9.    | REFERENSER .....   | 42 |
|       | APPENDIX A.....  | 1  |
|       | APPENDIX B.....  | 5  |
|       | APPENDIX C.....  | 8  |

# 1. INLEDNING

Den 13 januari 1982 omkom 78 personer då Air Florida flight 90 störtade endast tre kilometer från Vita huset i Washington, D.C. Ett kraftigt snöfall hade orsakat förseningar på flygplatsen, och vid gaten hade is avlägsnats från planet. Efter avisningen fick Flight 90 dock vänta ytterligare 45 minuter och för att inte försena flighten bestämde kaptenen tillsammans med andrepiloten att ingen ytterligare avisning av planet behövdes. Vid start hade så mycket is bildats på flygplanets vingar att det endast lyfte ett par hundra meter ovan mark och 30 sekunder senare störtade ned i 14th Street-bron över Potomacfloden.

För att förhindra att olyckor som denna sker används varje år hundratusentals ton avisningsvätskor världen över för att avlägsna is eller förebygga isbildning på flygplan. Avisningsvätskorna vid Stockholm Arlanda flygplats är baserade på propylenglykol då det effektivt sänker vattnets fryspunkt.

Ur säkerhetssynvinkel är användningen av avisningsvätskor nödvändig, men det finns potentiella miljöeffeter av användningen. Propylenglykols höga syreförbrukning vid nedbrytning kan orsaka syrebrist i vattendrag nedströms om det inte omhändertas av brukaren. Syrebristen orsakar stora störningar av det naturliga ekosystemet i vattendragen och kan leda till att vattenlevande organismer dör ut.

För att samla upp de avisningsvätska som används har man på Arlanda ett separat dagvattensystem, benämnt B-glykolsystemet. Snösmältvatten och regnvatten som avrinner från ytor där avisning utförs vintertid avrinner till B-glykolsystemet. Beräkningsmässiga massbalanser av använd och uppsamlad mängd propylenglykol (Swedavia, 2013) visar att den beräknade andelen uppsamlad glykol troligtvis är en underskattning av den faktiska uppsamlad mängden. Misstankar finns om att detta beror på en nedbrytning av propylenglykol i B-glykolsystemet. Detta behöver utredas för att utesluta att propylenglykol lämnar systemet på andra sätt.

## 1.1 SYFTE

Syftet med studien är att fastställa om det sker en nedbrytning av propylenglykol i det dagvattensystem vid Stockholm Arlanda flygplats som är ämnat för uppsamling av avisningsvätskor, samt att uppskatta nedbrytningens omfattning. Detta kommer öka förståelsen för uppsamlingssystemet och på så vis förbättra omhändertagandet av propylenglykol, vilket bidrar till en renare miljö.

### 1.1.1 Frågeställningar

Det finns fyra frågeställningar som styr arbetet i projektet.

De två huvudfrågeställningarna är:

- ❖ *Sker det en nedbrytning av propylenglykol i Arlanda flygplats uppsamlingssystem för avisningsvätskor?*
- ❖ *Hur stor del av den använda propylenglykolen kan uppskattas brytas ner?*

För att ta reda på detta behöver även följande frågeställningar behandlas:

- ❖ *Vilka faktorer påverkar nedbrytningen av propylenglykol?*
- ❖ *Vilka ackumuleringstider har vattnet i B-glykolsystemet?*

## 1.2 AVGRÄNSNINGAR

Studien är avgränsad till att endast utreda eventuell nedbrytning i ledningsnätet i dagvattensystemet ämnat för uppsamling av avisningsvätskor, även kallat B-glykolsystemet. Inget fokus har lagts på att undersöka eventuell nedbrytning i det dagvattensystem som tar emot avrinning från ytor utanför avisningsområden såsom snötipp, glykoluppsamlingsdammar, jord, hårdgjorda ytor eller diken nedströms. Inte heller nedbrytningen i den så kallade A-glykolen har studerats.

Då nedbrytning i ett dagvattensystem av denna storlek är en komplex process avseer inte denna studie att utreda hela problematiken utan att fungera som förstudie till kommande utredningar.

## 1.3 TILLVÄGAGÅNGSÄTT

För att uppfylla syftet med studien besvarades följande frågeställningar med ett flertal metoder.

För att besvara frågeställningen ”*Vilka faktorer påverkar nedbrytningen av propylenglykol?*” utfördes en litteraturstudie för att lägga en grund för metoderna som användes i studien.

För att besvara frågeställningen ”*Sker det en nedbrytning av propylenglykol i Arlanda flygplats uppsamlingssystem för avisningsvätskor?*” användes ett flertal metoder. Stickprover analyserades för nedbrytningsprodukter och ett nedbrytningsförsök i lab utfördes för att erhålla nedbrytningshastigheter för propylenglykol vid olika temperaturer. Fältmätningar av temperatur och syrehalt i B-glykolsystemet utfördes och visuella indikationer på att nedbrytning äger rum iakttoogs.

För att besvara frågeställningen ”*Vilka ackumuleringstider har vattnet i B-glykolsystemet?*” studerades data från vattennivåmätare i B-glykolsystemet för att sammanställa ackumuleringstider under avisningsperioderna 2012-2013 och 2013-2014 mellan 1 oktober och 1 mars. Dessa ackumuleringstider användes sedan till att uppskatta nedbrytningens omfattning.

För att besvara frågeställningen ”*Hur stor del av den använda propylenglykolen kan uppskattas brytas ner?*” skapades en beräkningsmodell.

## **2. BAKGRUND: AVISNING OCH UPPSAMLING**

### **2.1 ISBILDNING**

Vid låga temperaturer i kombination med nederbörd eller hög luftfuktighet bildas is på flygplan. Isbildningen stör luftens mjuka flöde runt vingarna och kan även sätta sig på viktiga instrument vilket påverkar farkostens aerodynamik under flygning. Detta innebär att flygplanets manövrering och lyftkraft drastiskt kan försämrats (Landberg, 2002). Is kan även lossna från vingarna och flyga in i och skada flygplanets motorer på flygplansmodeller där motorerna sitter bakom vingen.

Det var detta som skedde 1991 (Nationalencyklopedin, 2014) i den kända svenska flygplansolyckan utanför Gottröra, Uppland. Sedan länge hade det varit känt att isbildning är farligt vid flygning och efter denna olycka ökade säkerhetsåtgärder kring isbildning i Sverige. Avisningsvätskor hade länge används men efter olyckan började avisningsvätskor användas i en större omfattning (Johansson, 2014, pers. medd. ).

### **2.2 AVISNING**

Från början av oktober till maj utförs avisning av flygplan på Stockholm Arlanda flygplats. Naturligtvis kan det även ske tidigare och senare under året beroende på rådande väderförhållanden. Avisningen utförs med speciella avisningsfordon som sprutar avisningsvätskan på flygplanen där is behöver avlägsnas. Den vätska som används för avisning består till stor del av propylenglykol eftersom det effektivt sänker vattnets fryspunkt.

Avisningen sker vanligtvis vid lufttemperaturerna 3°C och nedåt samt vid luftfuktigheter då daggpunkten är mindre än 3°C under lufttemperaturen (Medelberg, 2014 pers. medd. ). Avisning sker även vid nederbörd i form av snö eller underkylt regn. Det är kaptenen för den individuella flighten som har fullt ansvar för om planet behöver avisas eller inte (Medelberg, 2014 pers. medd. ).

Avisningen på Arlanda sker endast vid tillåtna platser, så kallade avisningsytor som är lokaliserade på olika platser vid flygplatsen (Swedavia, 2013). Vanligtvis utförs avisningarna direkt vid gate men det finns även områden som inte ligger intill terminalerna. Avisningen utförs i nuläget av fyra avisningsbolag, Nordic Aero, Moose Aviation, Menzies och SAS Ground Handling. De avisar på uppdrag av flygbolagen och företagen har licensavtal med Swedavia för att utföra sin verksamhet på flygplatsen (Swedavia, 2013).

#### **2.2.1 Avisningsfordon**

På Arlanda används bemannade lyftkorgar monterade på lastbilschassin för att avisera flygplan. Lyftkorgarna är försedda med sprutanordning för avisningsvätska och det finns både öppna och stängda korgar. Väsketankarna i lastbilen är uppdelade i vatten och avisningsvätska som blandas med ett så kallat ”propmixsystem”. Systemet anpassar avisningsvätskans koncentration utifrån den rådande utetemperatur.

## 2.3 AVISNINGSVÄTSKOR

Kommersiella avisningsvätskor innehåller inte bara propylenglykol och vatten utan en hel del andra ämnen för att frambringa vissa egenskaper hos vätskan (Gooden, 1998). Glykolen används som tidigare nämnts för fryspunktnedsättning men det finns även tillsatser såsom flamskyddsmedel, pH buffrare, korrosionsinhibitorer och ytaktiva medel i avisningsvätskor (Gooden, 1998).

Det är dock svårt att ta reda på exakt vilka ämnen som en specifik avisningsvätska innehåller då detta är sekretessbelagt. På Arlanda används i nuläget endast avisningsvätskor från kemiindustriföretaget Clariant, vars produkter i Sverige distribueras av Aerochem AB. Två typer av avisningsvätska används och dessa har olika användningsområden.

### 2.3.1 Typ I: Safewing® MP I ECO PLUS (80)

Typ I är den avisningsvätska som används mest och är till för så kallad ”de-icing”. Som namnet antyder används den för att undanröja is och snö från flygplanet (tabell 1). Detta genomförs genom att med högt tryck spruta på den till 85 °C upphettade avisningsvätskan på synlig frost, is eller snö. Vätskan är orangefärgad för att lättare se var den applicerats och den har en viskositet liknande vattens. Mats Medelberg på Moose aviation (Medelberg, 2014, pers. medd.) uppskattar att 1 % av denna vätska stannar på flygplanet efter utförd avisning.

**Tabell 1** Safewing® MP I ECO PLUS (80):s kemiska egenskaper (Clariant, 2013a)

| Innehåll och egenskaper                                       | Värde   |
|---|---------|
| Propylenglykol (%)  | ≥ 80    |
| Vatten (%)  | 18 – 20 |
| Densitet, 20 °C (kg/dm <sup>3</sup> )                         | 1,04    |
| Biologiskt syrekrav BOD, 5 dagar, 20 °C (g O <sub>2</sub> /g) | 0,66    |
| Biologisk nedbrytbarhet, 10 dagar, 20 °C (%)                  | 98      |

### 2.3.2 Typ II: Safewing® MP II FLIGHT

För att inte återfrysning ska ske mellan avisningen och tills planet lyfter används typ II avisningsvätska även kallad ”anti-icing” (tabell 2). Typ II har högre viskositet än Typ I för att den bättre ska vidhäfta vingen. Enligt Mats Medelberg på Moose aviation (Medelberg, 2014, pers. medd.) påminner vätskans konsistens om ett trögflytande schampo och han bedömer att 95 % av den vätska som används stannar på vingen tills start.

För att inte vätskan skall följa med planet upp i luften och störa planets aerodynamik är den designad att släppa under start. Detta utförs genom att ge vätskan icke-Newtonska egenskaper som gör att viskositeten ändras vid en viss hastighet så att den lättare släpper från vingen vid start (Clariant, 2013b).

**Tabell 2** Safewing® MP II FLIGHT:s kemiska egenskaper (Clariant, 2013b)

| Innehåll och egenskaper                                       | Värde       |
|---|-------------|
| Propylenglykol (%)  | ≥ 50        |
| Vatten (%)  | 47,0 – 49,8 |
| Densitet, 20 °C (kg/dm <sup>3</sup> )                         | 1,04        |
| Biologiskt syrekrav BOD, 5 dagar, 20 °C (g O <sub>2</sub> /g) | 0,35        |
| Biologisk nedbrytbarhet, 10 dagar, 20 °C (%)                  | 90          |

## 2.4 UPPSAMLING AV AVISNINGSVÄTSKOR

Efter avisning omhändertar Swedavia merparten av den använda propylenglykolen. Detta sker med hjälp av uppsamlingsfordon och via speciella uppsamlingsrännor, som ligger nedgrävda på alla platser där avisning är tillåten. Den uppsugna propylenglykolen kallas A-glykol och samlas i tankar vid Swedavias glykoluppsamlingsanläggning innan den transporteras vidare.

Den glykol som inte sugs upp blandas med dagvatten från ytan och rinner via uppsamlingsrännor ner i ett ledningssystem, varefter det samlas upp i utjämningsdammar vid Swedavias glykoluppsamlingsanläggning. Denna propylenglykol, som kallas B-glykol, pumpas sedan från utjämningsdammarna ut till det kommunala spillvattennätet för vidare transport till Käppala reningsverk. Där fungerar propylenglykolen som en extra energikälla (Vatten och samhällsteknik, 2011).

### 2.4.1 A-glykol

Efter utförd avisning och när planet har lämnat gate uppsamlas den avisningsvätska som fortfarande ligger kvar på de hårdgjorda ytorna med vakuumsugbil. Den uppsamlade högkoncentrerade vätskan har en varierande glykolhalt mellan 5 – 25 % (Vatten och samhällsteknik, 2011) och benämns A-glykol.

Denna glykol mellanlagras i tankar för att sedan gå till Nordic Aeros glykolåtervinningsanläggning på flygplatsen eller skickas med lastbil till avloppsreningsverk i Västerås där den används som kolkälla i reningsprocesser (Swedavia, 2013).

### 2.4.2 Uppsamlingsfordon

De fordon som samlar upp A-glykolen är lastbilar utrustade med sugutrustning och är av samma typ som de som rengör gatorna från sand under våren (Medelberg, 2014, pers. medd.). En vakuumgenerator är ihopkopplad med vakuumtank på ett vanligt lastbilschassi. Under fordonen finns ett sugmunstycke som med hjälp av undertrycket i tanken suger upp avisningsvätskan från underlaget. Effektiviteten med avseende på hur mycket vätska som sugs upp varierar mycket beroende på underlagets jämnhet samt rådande väderlek (Medelberg, 2014, pers. medd.).

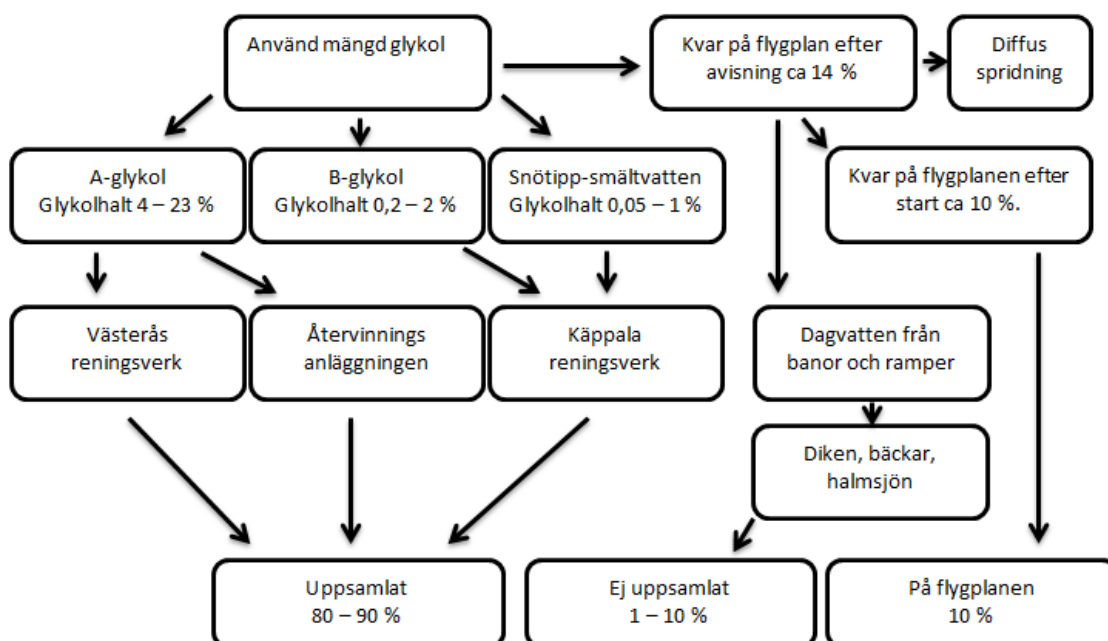


### 2.4.3 B-glykol

Alla avisningsytor på Arlanda är hydrologiskt avgränsade så att avisningsvätskor och nederbörd på dessa ytor samlas upp i ett separat dagvattensystem benämnt B-glykolsystemet. Den avisningsvätska som rinner ner i dagvattensystemets brunnar vid avisning benämns B-glykol. Koncentrationerna av glykol i B-glykolsystemet uppskattas ligga mellan 0,2 och 2 % (Vatten och samhällsteknik, 2011). Detta dagvatten pumpas från fördröjningsmagasin eller pumpgröpar genom tryckledningar till en uppsamlingsdamm. Även smältvatten från snötippen rinner till denna uppsamlingsdamm. Från denna damm pumpas en uppmätt mängd organiskt kol (analyserad som TOC, total organic carbon) per dygn in på kommunens spillvattenledning och vidare till Käppala avloppsreningsverk. När avisningsperioden är över, och det således inte finns något glykolhaltigt dagvatten, kopplas B-glykolsystemet om så att vattnet leds till det vanliga dagvattensystemet.

## 2.5 AVISNINGSVÄTSKORNAS FLÖDE PÅ ARLANDA

För att tydliggöra glykolflödet på Arlanda har Swedavia tagit fram en översiktlig massbalans för propylenglykol som visas i figur 1. Propylenglykolanvändningen varierar mycket mellan avisningssäsonger beroende på rådande temperaturer och väderförhållanden. Propylenglykolförbrukningen är mindre under milda avisningsperioder. I genomsnitt används ungefär tusen ton propylenglykol i avisningsvätskor under en avisningsperiod.



**Figur 1** Översiktlig massbalans för glykol vid Arlanda flygplats (Vatten och samhällsteknik, 2011, tillstånd)

## 2.6 GLYKOL

Etylenglykol och propylenglykol är de grunder som oftast används i avisningsvätskor. Glykoler är kolväten som tillhör gruppen alkoholer. Glykoler skiljer sig från vanliga alkoholer genom att de har en extra OH-grupp vid en av kolatomerna. Fram till tidigt 1990-tal var etylenglykol helt dominerande på avsiningsmarknaden på grund av sin lägre kostnad (Kemikalieinspektionen, 2003).

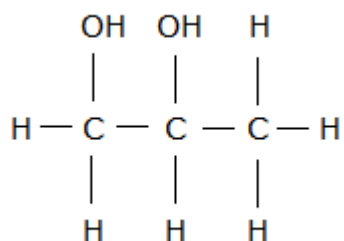
Studier har dock påvisat en hög toxicitet hos etylenglykol vilket lett till att det fasats ut från svenska flygplatser. Därför används idag enbart propylenglykol på Stockholm Arlanda flygplats. Både typerna är vicinal dioler vilket betyder att de har båda OH-grupperna vid närliggande kolatomer. Detta medför en polär struktur som gör dessa glykoler helt lösliga i vattenfas (Veltman m.fl., 1998).

### 2.6.1 Propylenglykol

Propylenglykol (se figur 2) även kallad 1,2-propandiol, propan-1,2-diol eller mono propylen glykol är en genomskinlig nästan luktfri vätska och med en svagt söt smak. Den används, förutom till avisning, även som konserveringsmedel och till bevaring av vätska i livsmedel och tobaksvaror som snus. Livsmedelsverkets beteckning för propylenglykol är E 1520 (Kemikalieinspektionen, 2003).

Molekylen har ett asymmetriskt centrum vilket gör att det finns två sorters stereoisomerer av ämnet. Avisningsvätskor brukar innehålla lika mycket av de båda stereoisomererna (Veltman m.fl., 1998). Propylenglykol är nedbrytbar, relativt oflyktig, och starkt syreförbrukande vid nedbrytning (högt BOD<sub>5</sub>-värde) (Cornell m.fl., 2000).

Flera studier stödjer att propylenglykol inte avgår till gasfas i signifikant mängd (EPA, 2000). Totalt består propylenglykolmolekylen viktmässigt av 47 % kol.



**Figur 2** Kemisk struktur för propylenglykol

### 3. BAKGRUND: NEDBRYTNING AV GLYKOL

Ett stort antal studier har genomförts på nedbrytningsprocessen av glykol. Fler inriktar sig på nedbrytning av etylenglykol än på nedbrytning av propylenglykol och ett fåtal inriktar sig på avsningsvätskornas nedbrytningsprocess. Av de studier som utfört fältförsök är de flesta utförda i jord och bara ett fåtal i vattensystem. Inga studier rörande nedbrytning av avsningsvätska eller glykol i dagvattensystem har påträffats.

#### 3.1 NEDBRYTNING

Mikroorganismerna använder propylenglykol vid nedbrytning som sin primära kol- och energikälla (Greco m.fl., 2012) och nedbrytningen kan ske på många olika sätt (Gooden, 1998). Beroende på vilken typ av nedbrytning som sker är det olika mikroorganismer som fungerar som nedbrytare och de använder olika elektronacceptorer såsom sulfat, nitrat, mangan(IV) eller järn(III) (Greco m.fl., 2012). För tillväxt av mikroorganismer är näringsämnen viktiga och det är oftast dessa som begränsar nedbrytningen (Gooden, 1998).

##### 3.1.1 Aerob nedbrytning

Nedbrytningen av propylenglykol med syreförbrukande mikroorganismer är oftast en snabbare process än anaerob nedbrytning (Toscano m.fl., 2012b). Slutprodukten vid aerob nedbrytning av glykol är koldioxid och vatten enligt reaktion (1) som ej innehåller intermediaten i processen.



Aerob nedbrytning kan ske via olika vägar. Den ena oxiderar propylenglykol till lactaldehyd som därefter metaboliseras till pyruvat som går in i trikarboxylsyrcykeln (Willetts, 1979). Den andra kataboliserar propylenglykol via diol dehydratas till propionaldehyd som därefter reduceras till n-propanol som är en slutprodukt i metabolismen (Willetts, 1979).

##### 3.1.2 Anaerob nedbrytning

Den anaeroba nedbrytningen kan ske på betydligt fler sätt än den aeroba processen. Istället för syre som elektronacceptor använder sig mikroorganismerna av andra oorganiska elektronacceptorer och propylenglykol används som energi- och kolkälla. I tabell 3 presenteras förenklade kemiska reaktioner för anaerob nedbrytning utan intermediat.

**Tabell 3** Reaktionen för anaerob nedbrytning av propylenglykol (Greco m.fl., 2012; Jaesche m.fl., 2006; Veltman m.fl., 1998; Seok & Komisar, 2003)

| Mikroorganismer   | Reaktionsformler  |
|-------------------|---|
| Nitratreducerande | $C_3H_8O_2 + 16/5 NO_3^- + 16/5 H^+ \rightarrow 3 CO_2 + 28/5 H_2O + 8/5 N_2$ |
| Sulfatreducerande | $C_3H_8O_2 + 16/5 SO_4^{2-} + 4 H^+ \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + 2 H_2S$     |
| Manganreducerande | $C_3H_8O_2 + 8 MnO_2 + 16 H^+ \rightarrow 3 CO_2 + 12 H_2O + 8 Mn^{2+}$       |
| Järnreducerande   | $C_3H_8O_2 + 8 Fe_2O_3 + 32 H^+ \rightarrow 3 CO_2 + 20 H_2O + 16 Fe^{2+}$    |
| Metanogena        | $C_3H_8O_2 \rightarrow CO_2 + 2CH_4$  |
| Fermenterande     | $C_3H_8O_2 \rightarrow C_3H_6O_2 + H_2$                                       |
|                   | $C_3H_8O_2 \rightarrow 1/2 C_3H_6O_2 + 1/2 C_3H_8O$                           |

### 3.1.3 Intermediat och nedbrytningsprodukter vid anaerob nedbrytning

I de anaeroba nedbrytningsprocesserna skapas flera intermediat och slutprodukter beroende på reaktion. N-propanol och propionat är de mest förekommande intermediaten (Schoenberg m.fl., 2000; Veltman m.fl., 1998; Gooden, 1998). De båda mellanprodukterna skapas samtidigt i olika mängder beroende på vilken sorts anaerob nedbrytning som sker. Propionat är det direkt oxiderade produkten av propylenglykol och n-propanol den reducerade produkten (Veltman m.fl., 1998). N-propanol kan vidare oxideras till propionat vilket gör att livslängden för n-propanol efter nedbrytningen är kort relaterat till propionat. Tiden som n-propanol är detekterbart är beroende på typ av nedbrytningsprocess och kan variera mellan 5 till 15 dygn (Schoenberg m.fl., 2000; Veltman m.fl., 1998; Gooden, 1998).

Andra intermediat som kan skapas i lägre koncentrationer är acetat (ättiksyra), laktat (mjölksyra), oxalat (oxalsyra) och formiat (myrsyra) (Schoenberg m.fl., 2000; Veltman m.fl., 1998; Gooden, 1998).

## 3.2 FAKTORER SOM PÅVERKAR NEDBRYTNINGSPROCESSEN

Nedbrytning av propylenglykol i miljön är mycket komplext och påverkas av många olika faktorer beroende på det system som undersöks. Nedbrytning i diken eller andra vattendrag påverkas mycket av naturligt förekommande mikroorganismer samt solljus (Corsi m.fl., 2001). I jord påverkas nedbrytningen av de mikroorganismer som finns naturligt i jordprofilen men också av förekomsten av metaller såsom järn och mangan (Greco m.fl., 2012). I ett dagvattensystem har faktorer såsom biofilmer på brunns- och rörväggar, omblandning, luftning, uppehållstider och tillgång på näringsämnen en större betydelse för nedbrytningsprocessen (Corsi m.fl., 2001).

### 3.2.1 Temperatur

Temperaturen i den miljö där nedbrytningsprocesser av propylenglykol äger rum påverkar nedbrytningshastigheten markant (Schoenberg m.fl., 2000).

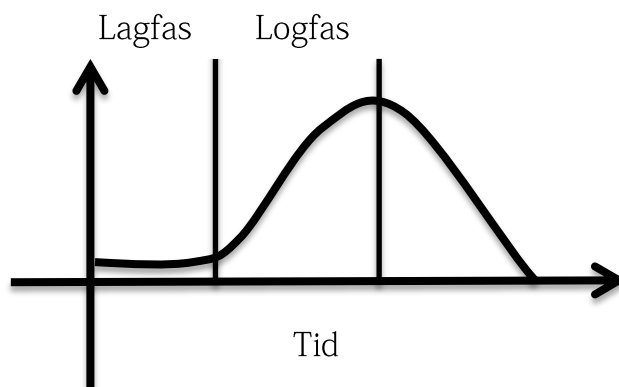
Nedbrytningshastigheten påverkas i liten grad mellan 35 °C och 25 °C. Vid temperaturer under 25 °C råder ett betydande temperaturberoende då lägre temperaturer dämpar mikroorganismernas aktivitet (Schoenberg m.fl., 2000). Dock kan nedbrytning av propylenglykol ske vid så låga temperaturer som -2 °C men med avsevärt lägre nedbrytningshastighet (Klecka m.fl., 1993). Ekvation 1 används för att beskriva sambandet mellan temperatur och nedbrytningshastigheten (Gooden, 1998).

$$k_1 = k_2 \theta^{T_1 - T_2} \quad (1)$$

$k_1$  och  $k_2$  med enhet mg/liter/dag är nedbrytningshastigheter vid temperaturerna  $T_1$  och  $T_2$ ,  $\theta$  är den termiska koefficienten. I studier utförda rörande temperaturberoendet vid nedbrytning har  $\theta$  beräknats till 1,09 (Klecka m.fl., 1993) i jordprofil men den varierar mycket beroende på system och typ av nedbrytare.

### 3.2.2 Mikroorganismer

Den viktigaste faktorn för nedbrytning av propylenglykol är mikroorganismer även kallade nedbrytare. I en stor studie av Greco m.fl (2012) utförd vid Gardermoen flygplats i Norge isolerades 19 bakteriestammar 2009 som kunde växa med propylenglykol som enda kolkälla. 2010 fann de ytterligare 32 bakteriestammar och de fann att tillväxt av dessa var möjlig vid låga temperaturer om näringsämnen som kväve (N) och fosfor (P) fanns tillgängligt i fördelningen C:N:P = 120:11:1 (Greco m.fl., 2012).



**Figur 3** Schematisk bild över mikroorganismers tillväxt

I nedbrytningsförsök kan tillväxt av mikroorganismer beskrivas med tre faser (se figur 3). Den första benämns lagfas (lag phase) då mikroorganismer växer till den nivå då nedbrytning är märkbar. När tillväxt av mikroorganismerna kommer igång tillväxer de exponentiellt i den andra fasen (log phase) och man ser en snabb nedbrytning av substrat såsom propylenglykol. Tillväxten stannar av helt i den tredje fasen då brist på näringsämnen begränsar celledelning (Gooden, 1998).

### 3.2.3 Syre

Syre som förbrukas i processen när nedbrytning av propylenglykol äger rum kan beskrivas med Biological oxygen demand (BOD) (Gooden, 1998). För en femdagarsperiod (BOD<sub>5</sub>) förbrukas ungefär ett gram syre per gram propylenglykol (Gooden, 1998).

### 3.3 NEDBRYTNINGSHASTIGHET

Nedbrytningshastigheter av propylenglykol kan antingen skrivas med enheten mg/l/dygn eller beskrivas med en första ordningens nedbrytningsmodell (ekvation 2) (Schoenberg m.fl., 2000).

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Parametern  $C_0$  är initialkoncentrationen propylenglykol med enhet mg/l. Nedbrytningskonstanten  $k$  har enhet  $\text{dygn}^{-1}$  och tiden  $t$  har enhet dygn. Koncentrationen efter nedbrytning benämns  $C$ .

Ett antal studier har utförts för att undersöka nedbrytningshastigheten av propylenglykol och etylenglykol. Eftersom avisningsvätskor på Arlanda flygplats är baserade på propylenglykol har i detta examensarbete större vikt lagts på att belysa studier som undersöker propylenglykols nedbrytningshastighet vid låga temperaturer. Den stora skillnaden mellan propylen- och etylenglykol är att syreförbrukningen (BOD) är större hos propylenglykol, vilket beror på att propylenglykol är en större molekyl än etylenglykol (Gooden, 1998).

Klecka m.fl. (1993) undersökte fem olika propylenglykolbaserade avisningsvätskors aeroba nedbrytningshastigheter i jord för temperaturerna - 2 °C och 8 °C. Nedbrytningshastigheternas medelvärden av propylenglykol vid - 2 °C var 2,3 mg/l/dygn (av intervallet 1,1 till 3,5). För 8 °C var nedbrytningshastigheternas medelvärden 22,7 mg/l/dygn.

Gooden (1998) studerade anaeroba nedbrytningshastigheten för propylenglykol i vattnen från en damm nedströms ett militärt avisningsområde utan uppsamling. Försöken utfördes utan att tillsätta tillväxthöjande näringsämnen vid 10 °C. Nedbrytningshastigheten ökade med koncentrationen propylenglykol där högsta koncentrationen hade en nedbrytningshastighet på 5,2 mg/l/dygn. Samma försök för 20 °C hade nedbrytningshastighet 12 mg/l/dygn.

Corsi m.fl. (2001) mätte nedbrytningen av avisningsvätskor innehållande propylenglykol (PG) i en bäck nedströms Mitchell International Airport i Milwaukee, Wisconsin, USA. Utifrån insamlad data beräknade Corsi att första ordningens nedbrytningskonstant ( $k$ ) var 0,8/dygn. Detta motsvarar en nedbrytningshastighet det första dygnet på 55 mg/l/dygn för 100 mgPG/l och 550 mg/l/dygn för 1000 mgPG/l. Temperaturen i bäcken skiftade mellan 6 °C på natten och 20 °C på dagen vilket kan ha bidragit till den höga nedbrytningskonstanten (Corsi m.fl., 2001).

Corsis nedbrytningskonstant var betydligt högre än vad som erhöles vid laborationsförsök av Cornell m.fl. (1999) och Camp m.fl. (1997). Nedbrytningskonstanten var i lab för 12 °C mellan 0,06/dag för 1000 mgPG/l till 0,17/dag för 100 mgPG/l. Dessa nedbrytningskonstanter motsvarar nedbrytningshastigheter för det första dygnet på 58 mg/l/dygn för 1000 mgPG/l och 16 mg/l/dygn för 100 mgPG/l.

Vid 4 °C var k mellan 0,05/dag för 1000 mgPG/l och 0,07/dag för 100 mgPG/l vilket motsvarar nedbrytningshastigheter det första dygnet på 49 mg/l/dygn för 1000 mgPG/l och 7 mg/l/dygn för 100 mgPG/l.

Corsi m.fl. presenterade en ny studie (2012) där de genom att studera den biologiska syreförbrukningen (BOD) uppskattade aerob nedbrytning för propylenglykol-baserade avsningsvätskor i sötvatten vid 5 °C. Testerna utfördes i laboratorium och näringsämnen för tillväxt av mikroorganismer tillsattes. Resultatet visade att 61 – 77 % av propylenglykolen brutits ned efter 40 dagar (Corsi m.fl., 2012).

### **3.4 INDIKATORER FÖR NEDBRYTNING**

När nedbrytning sker i ett system kan detta styrkas genom att vissa företeelser såsom låga eller sjunkande syrehalter uppmäts i miljön. Detta indikerar att en aerob nedbrytning äger rum (Gooden, 1998; Torstensson, 2014, pers. medd. ). Vid nedbrytning via anaerob fermentering skapas organiska syror som sänker pH och bufferkapaciteten medan anaeroba reducerande processer höjer pH-värdet och alkaliniteten (Torstensson, 2014, pers. medd. ). Därmed kan stora pH förändringar indikera att en anaerob nedbrytning äger rum.

Vid tillväxt av mikroorganismer ökar turbiditeten i vattnet vilket följs av att flockar skapas som sedan sedimenterar till botten när näringsämnen eller nedbrytningssubstratet propylenglykol tagit slut (Gooden, 1998). Förekomst av nedbrytningsprodukter eller intermediat i vattnet indikerar att en nedbrytning äger rum (Gooden, 1998).

Det finns även ett antal visuella indikatorer såsom bubblor på ytan skapat av den koldioxid eller metan som skapas. Synlig tillväxt av mikroorganismer i form av biofilm i systemet tyder starkt på mikrobiell aktivitet. När nedbrytning sker kan även lukt vara en indikator. En starkt stickande söt lukt som påminner om jäsning kan komma från de organiska syror som skapas (Gooden, 1998).

## 4. METOD

För att besvara frågeställningen ”*Sker det en nedbrytning av propylenglykol i Arlanda flygplats uppsamlingsssystem för avsningsvätskor?*” studerades tre pumpbrunnar där vattnet kan uppehållas en längre tid. I dessa pumpbrunnar undersöktes ett antal variabler såsom temperatur, syrgashalter och förekomster av nedbrytningsprodukter.

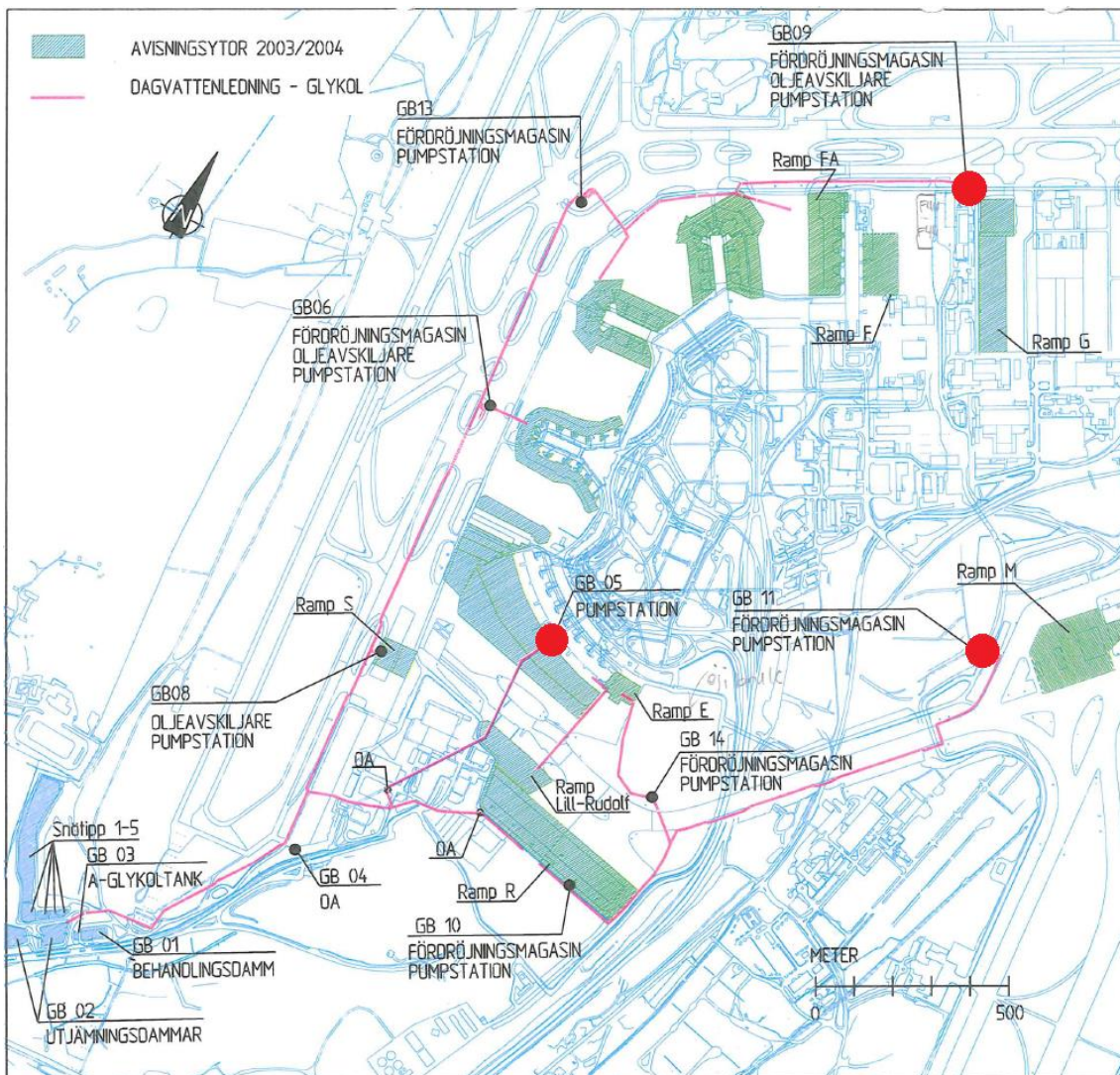
Ett kontrollerat nedbrytningsförsök utfördes för ge svar till föregående frågeställning och även frågeställningen ”*Hur stor del av den använda propylenglykolen kan uppskattas brytas ner*”. För att ytterligare besvara denna frågeställning studerades vattnets ackumuleringstid i pumpbrunnarna. Dessa ackumuleringstider användes sedan i en beräkningsmodell som med hjälp av nedbrytningshastigheter uppskattade den totala nedbrytningen i B-glykolsystemet.

### 4.1 PLATSBESKRIVNING

Arlanda flygplats samlar upp avsningsvätska som inte sugts upp av uppsamlingsfordon med ett dagvattensystem benämnt B-glykolsystemet (rosa streckat i figur 4) som är designat för att ta emot avrinning från avsningsytor (gröna i figur 4). B-glykolsystemet består av tre större fördröjningsmagasin, dessa benämns GB09, GB13 och GB14. Det finns även fyra mindre fördröjningsmagasin och pumpstationer i B-glykolsystemet som benämns GB05, GB06, GB11 och GB10. Vattnet ansamlas och fördröjs på dessa platser tills det stigit till en bestämd nivå.

Därefter pumpas vattnet vidare och rinner via tryckledningar och självfallsledningar till uppsamlingsdammen GB01. På vägen passerar vattnet några mindre utjämningsmagasin. Vid för höga flöden kan vatten pumpas från GB01 över till den extra uppsamlingsdammen GB02. Denna studie har studerat ett större fördröjningsmagasin GB09 och ett mindre fördröjningsmagasin GB05, men prover har även tagits i GB11. Dessa brunnar är rödmarkerade i figur 4.





Figur 4 Karta över B-glykolsystemet (Luftfartsverket, 2005,tillstånd)

#### 4.1.1 Pumpbrunn GB05

I källaren under Gate 65 vid terminal 2 är pumpbrunnen GB05 belägen. Den har en totalvolym på 63 m<sup>3</sup> varav mindre än hälften är effektiv vattenvolym. Hit avrinner glykolförorenat vatten från avisningsytorna vid terminal 2 och terminal 3 samt från Ramp Rudolf ("Lill Rudolf"). Sammanlagt är detta avrinningsområde 9,4 ha och består enbart av hårdgjorda ytor (Ramböll, 2004).

Vattennivån i pumpbrunnen avläses med en ultraljudsgivare av märket Endress Hauser FMU40 belägen i mitten på en av de lockskenor av metall som täcker pumpbrunnen. Ultraljudsgivaren har en upplösning på 1 mm och mätfel ± 2 mm. När vattennivån når 1,4 m börjar vatten automatiskt pumpas ut tills vattennivån når 0,75 m. Både pumparna och pumpgropen är dimensionerade för vinterregn med ett års återkomsttid (Ramböll, 2004). Vid extrema flöden kan bräddning ske i pumpbrunnen. Då leds vattnet vidare till det ordinära dagvattensystemet.

#### **4.1.2 Fördröjningsmagasin och pumpbrunn GB09**

Dagvattnet från avisningsytorna vid ramp G leds till pumpbrunn och fördröjningsmagasin GB09 i flygplatsens nordöstra hörn. Totalt är avrinningsområdet till GB09 2,9 ha. GB09 består av en betongkassun belägen under mark som har en totalvolym på 420 m<sup>3</sup> varav ca en tredjedel är effektiv vattenvolym. Till skillnad från GB05 har GB09 två pumpar för att vid behov effektivare sänka den stora volym vatten som magasineras. Vattennivån avläses av ultraljudsgivare av samma sort som GB05 och pumparna startar automatiskt när nivån når 1 m och slutar pumpa vid 0,45 m. Vid extrem nederbörd kan bräddning ske vilket leder vattnet till samma ledning som pumparna annars pumpar till (Ramböll, 2004).

#### **4.1.3 Pumpbrunn GB11**

Dagvatten från avisningsytan vid ramp M avleds till en utjämningsdamm (Ramböll, 2004). Därifrån leds vattnet genom självfallsledning till pumpbrunn GB11 med effektiv vattenvolym 5 m<sup>3</sup>. Pumpbrunnen GB11 har en annan utformning än GB05 och GB09 Osom påminner mer om en traditionell brunn.

#### **4.1.4 Ledningssystemet**

Största delen av B-glykolsystemet består av tryckledningar vilket gör att vattnet inte får några längre uppehållstider i ledningarna mellan fördröjningsmagasin och pumpbrunnar (Johansson, 2014, pers. medd. ). Undantaget fördröjningsmagasin och pumpbrunnar är vattnet sällan eller aldrig stillastående vilket det kan vara i mer traditionella dagvattensystem som endast har självfall. Då det inte rör sig om större volymer stillastående vatten har, i denna studie, nedbrytning i ledningssystemet ansetts försumbar.

### **4.2 PROVTAGNING**

Stickprover i fält togs vid tre olika tillfällen i GB05,GB09 och GB11 för att sedan analyseras (se avsnitt 4.4). En bestämd mängd vatten uttogs från GB05 och GB09 för att användas i nedbrytningsförsöket (se avsnitt 4.5). Pumpbrunnarnas och fördröjningsmagasinens utformning försvårade provtagningen. För att komma åt vattnet som på vissa ställen förekom på nivåer fyra meter under marken användes ett fem liters kärl som hissades ned med rep. Kärlet läts sjunka för att fyllas helt med ytvatten för att sedan hissas upp.

För nedbrytningsförsöket fylldes tre kärl á 2,5 liter vid vardera pumpgrop. Proverna transporterades sedan till Kolsta reningsverk söder om Arlanda flygplats där nedbrytningsförsöket utfördes. För närmare beskrivning av nedbrytningsförsöket och den provtagning som gjorden inom ramen för detta, se avsnitt 4.5.

Vid stickprovtagning fylldes 15 ml provflaskor. Lite luft lämnades i flaskorna för att frysning av proven inte skulle förstöra flaskorna. Proverna transporterades i frysväska för att sedan förvaras i frys tills proverna skickades för analys vid det externa laboratoriet ALcontrol. Provtagning har även utförts av ALcontrol (ALcontrol Laboratories) i utloppet från ledningssystemet till uppsamlingsdamm GB01 som

användes i sammanställningen av n-propanolförekomster (se avsnitt 4.4.1). Vattnet pumpas automatiskt upp till ett kärl i ett kylskåp där proverna tagits.

### **4.3 MÄTNINGAR I FÄLT**

#### **4.3.1 Temperatur**

En av de faktorer som påverkar nedbrytning av propylenglykol markant är temperaturen. För att kunna bedöma vilken grad av nedbrytning som eventuellt sker i pumpbrunnarna är vetskap om temperaturen av vattnet central. Temperaturmätningar utfördes i pumpbrunn GB05, GB09 och GB11. För detta användes tre CR1000 loggers från Campbell Scientific, Logan, USA.

Temperaturgivarna var två av modell 109 och en av modell 107. Mjukvaran PC200W (Campbellsci, 2014) användes för programmering av loggerprogram och även för insamling av temperaturdata. Mätningarna utfördes i GB11 från 28 januari till 26 februari 2014. I GB05 och GB09 utfördes mätningar från 4 till 26 februari. Ett pumphaveri orsakade kritiskt höga vattennivåer i GB09 så mätutrustningen togs upp mellan 13 och 18 februari för att inte förstöras.

#### **4.3.2 Syrgashalt**

Syrgashalten mättes i GB05, GB09 och GB11 vid ett antal tillfällen med syremätare HACH LANGE HQ30d. Mätningar utfördes endast en decimeter under ytan då vattnet var svåråtkomligt på grund av pumpbrunnarnas utformning.

### **4.4 ANALYSER**

Analys utfördes på stickprover tagna i fält från tidigare nämnda pumpbrunnar, på vattnet som användas i nedbrytningsförsöket (se avsnitt 4.5.2) och på avisningsvätska. De variabler som analyserades var propylenglykol, n-propanol och TOC.

#### **4.4.1 N-propanol**

Vattnet från stickprovtagningen analyserades för nedbrytningsprodukten n-propanol. Provtagningar utfördes i GB05, GB09 och GB11. Tidigare beställda propylenglykolanalyser av Swedavia utförda av ALcontrol i utloppet från B-glykolsystemet omfattade även n-propanolanalyser. Dessa användes i sammanställningen av n-propanolförekomster i B-glykolsystemet. Analyserna omfattade även propylenglykol och TOC.

#### **4.4.2 Avisningsvätskans kemiska sammansättning**

För att bättre förstå den kemiska sammansättningen i avisningsvätskorna utfördes en provtagning av Safewing® MP I ECO PLUS (80) för att analysera propylenglykol, TOC, n-propanol, totalt kväveinnehåll och total fosfor. Provtagningen gjordes i tanken till avisningsfordon på Moose Aviation tillsammans med Mats Medelberg. Enligt Mats Medelberg var temperaturen i tanken runt 85 °C under provtagningen och koncentrationen avisningsvätska ca 30%. Denna koncentration baserades på den rådande utetemperaturer då blandningen sker med det automatiska ”propmixsystemet” i fordonet. Provtagningens huvudsakliga syfte var att utesluta att n-propanol existerar i

produkten och att undersöka om kväve- och fosforinnehållet kan påverka mikrobiell tillväxt i B-glykolsystemet. Detta har visats påverka nedbrytningen av andra avsningsvätskor enligt Gooden (1998). Analysen utfördes av ALcontrol med metod ALKOG KMO-88 för analys av propylenglykol och n-propanol. För analys av totalfosfor användes SS-EN ISO 15681-2:2005. Total-kväveanalysen som användes var SS 028101-1.

#### **4.4.3 TOC mätning med kyvettmetod**

Mätningar av TOC utfördes på prover tagna vid GB05 och GB09 för att vara försäkrad om att vattnet som senare användes i nedbrytningsförsöket (se avsnitt 4.5) innehöll propylenglykol.

För att analysera TOC användes HACH LANGE:s kyvettmetod LCK 386 och LCK 387. LCK 386 analyserar TOC i intervallet 30-300 mg/l och LCK 387 i intervallet 300-3000 mg/l. Ett prov från vardera pumpgröp förbereddes.

I provkyvetten tillsattes 1 ml av provet som sedan skakades fem minuter i skakaren TOC-X5 för att driva av det totala oorganiska kolet (TIC). Sedan tillsattes en indikatorlösning och provet upphettades till 100 °C i ugn och därefter sänktes temperaturen till 95 °C för att stå i två timmar. Uppvärmningen utförs för att oxidera TOC till koldioxid som passerar genom ett membran från provkyvetten till indikatorkyvetten. När koldioxid kommer in i indikatorkyvetten sker en färgförändring som sedan kan avläsas av spektrofotometer för att erhålla TOC-halten. Det som skiljer i utförandet av de två kyvettmetoderna är att LCK 387 späds ut för att detta test har ett större mätintervall.

### **4.5 NEDBRYTNINGSFÖRSÖK**

Nedbrytning av glykol påverkas av många olika faktorer i den miljö som undersöks, vilket gör att nedbrytningen måste undersökas specifikt för systemet av intresse (Gooden, 1998). Eftersom nedbrytningen var problematisk att mäta direkt i pumpbrunnarna GB05 och GB09, på grund av faktorer såsom utspädning och utbyte av vattenmassor, utfördes ett kontrollerat nedbrytningsförsök. Försöket utfördes på laboratorium vid Kolsta reningsverk söder om Arlanda flygplats.

#### **4.5.1 Utförande**

Tre kylskåp med olika temperaturer användes i försöket. För att försäkra att temperaturen stabiliserat sig utfördes temperaturmätningar på vanligt dricksvatten placerat i kylskåpen dagen innan nedbrytningsförsökets start. Temperaturerna i kylskåpen var vid start 0,2, 5,2 och 14,7 °C. I vardera kylskåp placerades två 2,5 liters kärl med vatten från GB05 och GB09 (figur 5 t.v). Locken avlägsnades för att göra syre tillgängligt och eventuell aerob nedbrytning möjlig. Eftersom propylenglykol har ett lågt ångtryck bör avdunstningsförluster vara försumbara under försökets gång (EPA, 2000).



**Figur 5** (t.v) 2,5 liters kärl i kylskåp. (t.h) provtagningsflaska.

Innan provtagning mättes temperaturen i varje kärl för att säkerställa att ingen temperaturändring ägt rum. Även andelen löst syre mättes med syremätare HACH LANGE HQ30d innan provtagning. Provtagningen för analys av propylenglykol och TOC från kärnen utfördes efter att 2,5 liters kärlet skakats tio gånger genom att snabbt vända kärlet upp och ned. Även då propylenglykol skall lösas helt i vattnet enligt litteraturen, utfördes denna omblandning för att eliminera eventuell skiktning av vätskan.

Vattnet hälldes sedan ned i en 15 ml provflaska (figur 5 t.h) med hjälp av tratt som mellan provtagningarna tvättades med avjoniserat vatten och torkades. Provflaskorna fylldes ej helt för att de inte skulle förstöras vid frysning. Provflaskorna transporterades i frysväska för att sedan frysas in.

Denna provtagning utfördes samma klockslag dag 0, dag 3, dag 6 och dag 14 efter nedbrytningsförsökets start. Proven från dag 0 förvarades under 8 dygn i fryn innan de skickades för analys till det ackrediterade analyslaboratoriet ALcontrol (ALcontrol Laboratories). Resterande prov skickades 15 dygn efter dag 0 för analys.

#### **4.5.2 Analyser**

Analyserna utfördes av det externa laboratoriet ALcontrol AB i Linköping. För analys av TOC användes den av SWEDAC ackrediterade metoden SS-EN 1484-1. Analys av TOC utförs genom katalytisk förbränning uppföljt av IR-spektroskopisk bestämning av bildad CO<sub>2</sub>.

Metoden som användes för analys av propylenglykol var KMO-88 ALKOG som inte är ackrediterad av SWEDAC. Analysen utförs med GC/FID (Gaskromatografi/Flame Ionization detector). Metoden analyserar, förutom propylenglykol, elva andra alkoholer och glykoler.

För analyser av total fosfor användes SS-EN ISO 15681-2:2005 och för totalkväve SS 028101-1(Devardas). Dessa analyser utfördes endast på proverna tagna dag 0, 3 och 14 från GB05 och GB09 förvarade i temperaturen 5,2 °C.

#### 4.6 VATTNETS ACKUMULERINGSTID I PUMPBRUNNAR

Denna metod användes för att besvara frågeställningen ”*Vilka ackumuleringstider har vattnet i B-glykolsystemet?*”. Med ackumuleringstid menas tiden som vatten uppehölls i brunnen. Kontinuerliga vattennivåmätningar utförs i alla pumpbrunnar inom B-glykolsystemet av ultraljudsgivare kopplade till en kontrollserver vid VA-enheten på Swedavia. Genom att gå igenom loggade nivådata från pumpbrunnarna GB05 och GB09 sammanställdes volymer och ackumuleringstider längre än 24 timmar.

Denna avgränsning av datasammanställningen gjordes på grund av studiens tidsbegränsning och om ackumuleringstider under 24 timmar tagits med hade tusentals små entimmes ackumuleringstider fått sammanställas. Den potentiella nedbrytningen under dessa små ackumuleringstider kan ses som försumbar ställt mot ackumuleringstider på 24 timmar eller längre. Sammanställning av data utfördes för avisningsperioder 2012-2013 och 2013-2014 mellan datumen 1 oktober - 28 februari.

Vid samtliga ackumuleringstider antecknades startvolym  $h_0$ , slutvolym  $h_1$ , ackumuleringstiden  $t$ , nivåskillnad  $\Delta h$ . Ackumuleringstiderna delades även in i två kategorier, flack och kontinuerligt stigande för att sedan användas i beräkningsmodellen (se avsnitt 4.7). Vid de ackumuleringstider som kategoriserades som flack tillkom inga större volymer vatten förrän under de sista timmarna. Vid de ackumuleringstider som kategoriserades som kontinuerligt stigande tillkom större volymer vatten kontinuerligt under hela ackumuleringstiden.

#### 4.7 BERÄKNINGSMODELL FÖR NEDBRYTNING

För att uppskatta den potentiella nedbrytningen av propylenglykol i B-glykolsystemet skapades en beräkningsmodell. Modellen syftar till att ge en uppfattning om nedbrytningens omfattning. Uppskattningen jämfördes sedan med hur mycket propylenglykol som används på Arlanda under samma period.

Utifrån ackumuleringstider i GB05 och GB09 (se appendix A) beräknades potentiell nedbrytning (se avsnitt 4.7.1 och 4.7.2) för avisningsperioderna 2012-2013 och 2013-2014 mellan datumen 1 oktober och 28 februari. Anledningen till att inte hela avisningsperioden studerades var att studiens tid var begränsad.

Baserat på uppmätta temperaturer i B-glykolsystemet (se avsnitt 5.1) valdes rimliga nedbrytningshastigheter ( $\lambda$ ) utifrån litteraturen. Enligt litteraturen bör nedbrytningshastigheterna vid dessa temperaturer ligga mellan 10 och 50 mg/l/dygn (Cornell m.fl., 1999; Camp m.fl., 1997; Klecka m.fl., 1993) beroende på koncentration propylenglykol i vattnet. För GB05 användes nedbrytningshastigheten ( $\lambda$ ) 25 mg/l/dygn och för GB09 användes 20 mg/l. Dessa nedbrytningshastigheter baserades förutom på temperaturen även på förekomster av propylenglykol i B-glykolsystemet (se avsnitt 5.2.1). Eftersom temperaturmätningarna är utförda under årets vanligtvis kallaste månad användes något högre nedbrytningshastigheter.

I modellen antogs att propylenglykol tillkommer kontinuerligt till pumpbrunnarna och att det alltid finns propylenglykol tillgängligt för nedbrytning. Dessutom antogs det att nedbrytningshastigheten inte ändras under hela perioden och att det endast är en aerob nedbrytning som sker. Därtill gjordes antagandet att nedbrytningen inte begränsas av näringsämnen som kväve och fosfor.

#### 4.7.1 Beräkningar för kontinuerligt stigande vatten

På varje uppmätt ackumuleringstider kategoriserad som ”kontinuerligt stigande” utfördes dessa beräkningar. Stigningen av vattnet antogs vara kontinuerlig enligt linjens ekvation från startvolym  $V_0$  till slutvolym  $V_{tot}$ . Volymen delades in i tre delar för att vatten tillkommer i pumpbrunnen med tiden. Startvolymen benämns  $V_0$ , volymen med ackumuleringstid  $t_{2/3}$  (2/3 av den totala ackumuleringstiden  $t$ )  $V_{2/3}$  och volymen med ackumuleringstid  $t_{1/3}$  (1/3 av den totala ackumuleringstiden av  $t$ ) benämndes  $V_{1/3}$ . Modellen utformades så att den enda inparametern var nedbrytningshastighet  $\lambda$  i mg/l/dygn som beräknades om till mg/l/h. För varje ackumuleringstid med kontinuerligt stigande vatten utfördes beräkningar enligt ekvation 3.

$$\text{Nedbruten propylenglykol} = (\lambda V_0 t) + (\lambda V_{2/3} t_{2/3}) + (\lambda V_{1/3} t_{1/3}) \quad (3)$$

Förenklad exempelberäkning för  $\lambda = 24 \text{ mg/l/dag} = 1 \text{ mg/l/h}$  för ackumuleringstiden 48 timmar med  $V_0 = 90000 \text{ l}$ ,  $V_{2/3} = 5000 \text{ l}$ ,  $V_{1/3} = 2000 \text{ l}$ , densitet  $\varphi = 1,04 \text{ kg/l}$ .

$$\begin{aligned} & \left(1 \frac{\text{mg}}{\text{lh}} \cdot 90000 \text{ l} \cdot 48 \text{ h}\right) + \left(1 \frac{\text{mg}}{\text{lh}} \cdot 5000 \text{ l} \cdot 48 \cdot \frac{2}{3} \text{ h}\right) + \left(1 \frac{\text{mg}}{\text{lh}} \cdot 2000 \text{ l} \cdot 48 \cdot \frac{1}{3} \text{ h}\right) \\ & = 4512000 \text{ mg} = 4,512 \text{ kg} \\ & \frac{4,512 \text{ kg}}{\varphi} = 4,33 \text{ liter nedbruten propylenglykol} \end{aligned}$$

#### 4.7.2 Beräkningar för kategorin flack ackumuleringstid

Då det var viss stigning av vattennivån även i de uppmätta ackumuleringstider som kategoriserades som flacka försumrades den tillkomna volymen vatten då den antingen var obetydligt liten eller tillkom i slutet av ackumuleringstiden. Beräkningarna för dessa ackumuleringstider utfördes med ekvation 4.

$$\text{Nedbruten propylenglykol} = (\lambda V_0 t) \quad (4)$$

#### 4.7.3 Sammanställning

För att sedan få den potentiella nedbrytningen för hela avsningsperioden summerades samtliga beräknade värden på nedbrytningen från ovanför utförda beräkningar. Med hjälp av propylenglykolens densitet erhöles den totala nedbrutna propylenglykolen i liter.

Beräkningarna är endast utförda på ackumuleringstider i GB05 och GB09. B-glykolsystemet har ytterligare fyra pumpbrunnar där vattnet kan fördröjas. Två av dessa (GB13, GB14) påminner om GB09 i sin utformning och de resterande två (GB06, GB10) påminner mer om GB05. För att uppskatta nedbrytningen i hela B-

glykolsystemet och inte endast GB05 och GB09 multiplicerades resultaten från vardera pumpbrunn med tre.

För att kunna relatera resultatet till hur mycket propylenglykol som användes sammanställdes propylenglykolanvändningen av handlingsbolagen för perioderna 2012/2013 och 2013/2014 mellan 1 oktober - 28 februari (se appendix A, tabell A5-6).



## 5. RESULTAT

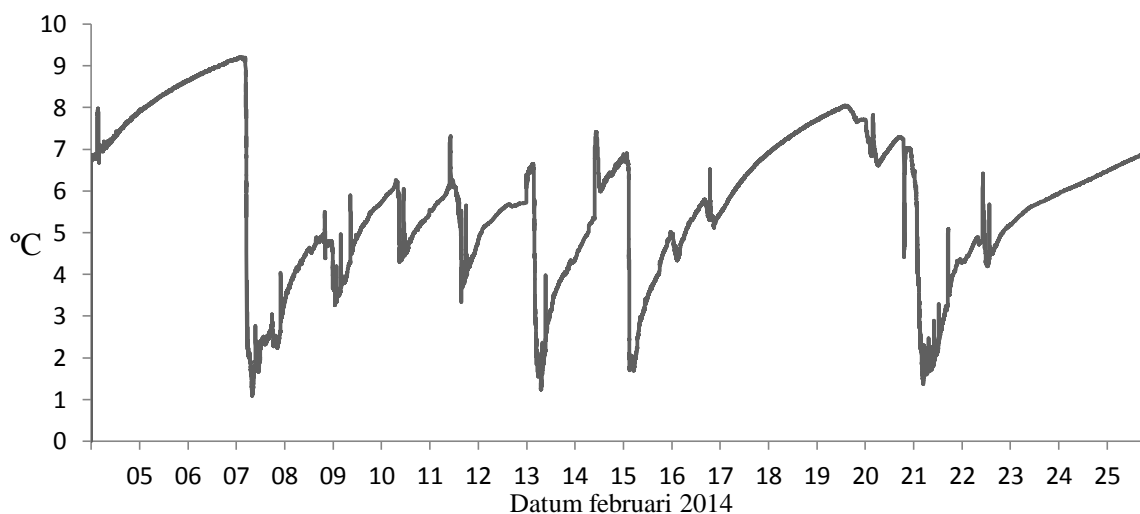
Nedbrytning är enligt litteraturuppgifter möjlig vid den temperatur som uppmättes i pumpbrunnarna. Låga syregashalter i slutet av ackumuleringsstider uppmättes.

Analysresultaten för stickproverna tagna i B-glykolsystemet visade att nedbrytningsprodukten n-propanol är närvarande i pumpbrunnarna. I nedbrytningsförsöket kunde en reduktion av propylenglykol, TOC och syrgashalt avläsas från analysresultaten. Beräkningsmodellen uppskattade nedbrytningen till mellan 1 och 2,5 promille utifrån nedbrytningshastigheter baserade på uppgifter i litteraturen, uppmätta temperaturer och propylenglykolkoncentration i B-glykolsystemet.

### 5.1 TEMPERATUR, SYRE OCH VISUELLA INDIKATIONER

Temperaturmätningarna i GB05 som utfördes från den 5 februari till den 25 februari 2014 visas i figur 6. Den högsta uppmätta temperaturen under mätperioden var 9,1 °C och den lägsta var 1,3 °C. Medelvärdet som temperaturen fluktuerar kring var 5,8 °C. Temperaturen i GB05 varierade med totalt 7,8 °C vilket är den högsta uppmätta temperaturvariationen i studien. Detta beror på att GB05 ligger inomhus under terminal 2 och värms upp av omgivningen. På grund av detta är temperaturen högre i GB05 än i GB09 och GB11.

Temperatursänkningar sker när nytt vatten tillkommer efter pumpning. Den stora temperatursänkningen som kan avläsas den 7 februari i figur 6 är slutet på en 69 timmar lång ackumuleringsstid (se appendix A, tabell A1) med start den 4 februari. Det kan även avläsas hur temperaturen stiger innan denna utpumpning. En annan längre ackumuleringsstid varade 80 timmar från den 17 till den 20 februari (se appendix A, tabell A1) där en tydlig temperaturökning kan avläsas i figur 6.

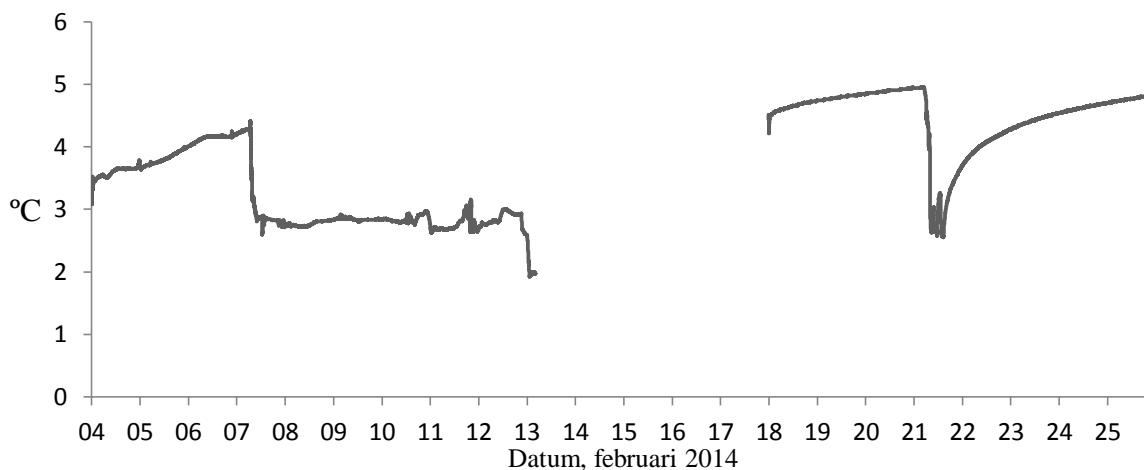


**Figur 6** Temperatur i pumpbrunn GB05

Temperaturmätningarna utförda i GB09 (figur 7) fick på grund av ett pumphaveri som orsakade höga flöden avbrytas mellan 13 februari och 18 februari. Den högsta uppmätta

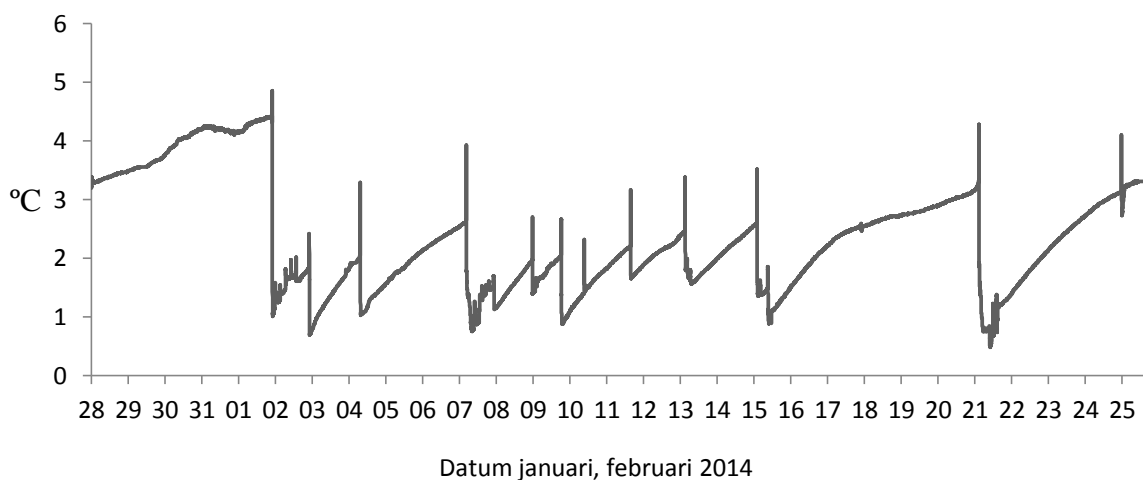
temperaturen var 5 °C och den lägsta 2,1 °C. Medelvärdet för temperaturen i GB09 var 3,8 °C. Natten mellan den 7-8 februari pumpades vatten ut som uppehållits 170 timmar i GB09. Innan detta kan en tydlig temperaturokning avläsas i figur 7 som sedan faller när vattnet pumpas ut och nytt vatten tillkommer.

En annan längre ackumuleringstid var 142 timmar från 15 februari till 21 februari. Temperatursänkningen vid utpumpningen den 21 februari kan avläsas i figur 7 som sedan stadigt ökar igen när vattnet blir stillastående.



**Figur 7** Temperatur i fördröjningsmagasin och pumpbrunn GB09

Mätningar av temperatur i GB11 (figur 8) utfördes från 28 januari till 25 februari. De höga toppar som kan avläsas innan temperatursänkningar är ett resultat av att temperaturgivaren hamnat över ytan vid utpumpning av vatten. Högsta uppmätta temperaturen som inte är en topp orsakad av detta var 4,4 °C och lägsta 0,6 °C. Medelvärdet i GB11 var 2,3 °C. Inga ackumuleringstider har erhållits för GB11 men även här bör temperatursänkningarna bero på utpumpningen av vatten och nytt vatten tillkommer. Även här bör temperaturokningarna ske när vattnet blir stillastående.



**Figur 8** Temperatur i pumpbrunn GB11

Syremätningarna som utfördes i B-glykolsystemet under fem separata tillfällen presenteras i tabell 4. Inga av syremätningarna utfördes under samma ackumuleringstid då ackumuleringstiderna var förhållandevis korta i februari på grund av mycket nederbörd i form av regn. Lägre syrgashalt kan avläsas när vatten uppehållts en längre tid såsom den 26 februari i GB05 där vattnet uppehållts i 81 timmar vid mätning. Syremätningarna som utfördes den 28 januari är i slutet på den längsta ackumuleringstiden som mätts upp som varade 499 timmar. Dock syresattes förmodligen vattnet en aning mellan 22-24 januari på grund av nederbörd. Resultaten visar låga värden i jämförelse med den maximala syremättnaden vid 0 °C, ca 14 mg/l O<sub>2</sub>, och vid 10 °C, ca 11 mg/l O<sub>2</sub> för rent vatten.

**Tabell 4** Syrgashalt i GB05,GB09 och GB11

| Pumpbrunnar                | 140128 | 140204 | 140213 | 140218 | 140226 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| GB05 O <sub>2</sub> (mg/l) | 0,97   | 9,78   | 8,16   | 6,5    | 0,56   |
| GB09 O <sub>2</sub> (mg/l) | 3,14   | 9,68   | 11,76  | 7,07   | 4,14   |
| GB11 O <sub>2</sub> (mg/l) | 4,78   | 7,07   | 6,06   | 5,26   | 9,56   |

Under provtagningar och intallation av temperaturloggers iaktogs ett antal indikationer på att nedbrytning sker i B-glykolsystemet. I samtliga pumpbrunnar som undersöktes iaktogs bubblor vid ytan (se appendix B, figur B5). I GB05 inloppsrör och längs pumpbrunnens kanter iaktogs ett kletigt grönbrunt slam (se appendix B, figur B4) som även fastnade på temperaturgivaren till loggern (se appendix B, figur B6).

I ledningssystemets utlopp till uppsamlingsdammen påträffades ett brandgult slam (se appendix B, figur B3) samt grönbrunt slam i en provtagningsbrunn tio meter från utloppet.

Samtliga pumpbrunnar gav ifrån sig en söt lukt, och lukten var extra påtaglig vid GB05. Odören var stickande och näst intill kvävande vid vissa tillfällen.

Under nedbrytningsförsöket iaktogs att vattnet som först var nästan genomskinligt vid försökets start blev grumligare med tiden (se appendix B, figur B1), för att senare bli en klar vätska där organisk tillväxt kunde ses med blotta ögat (se appendix B, figur B2). Detta liknar iakttagelser Goodens (1998) beskriver vid sina nedbrytningsförsök.

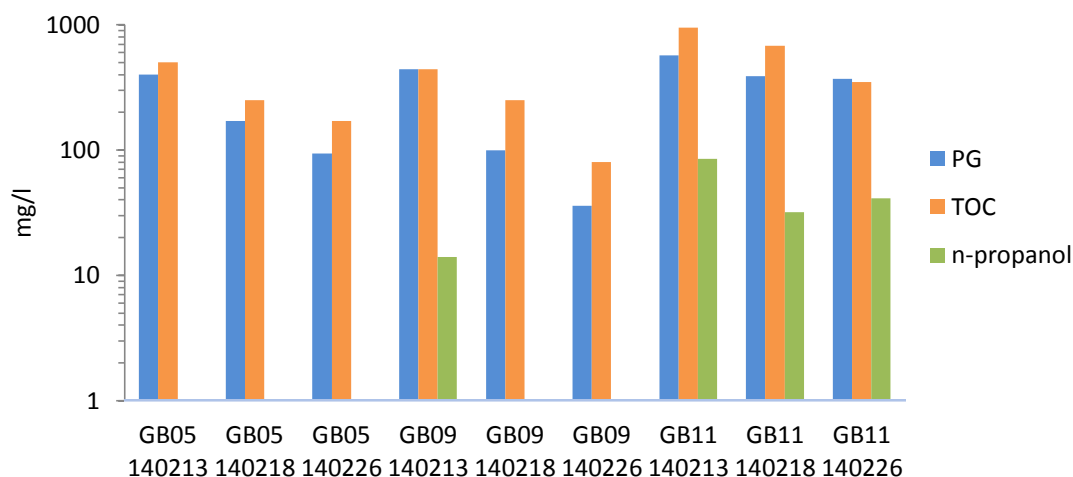
## 5.2 ANALYSER

### 5.2.1 Propylenglykol, n-propanol och TOC

Den högsta förekomsten av nedbrytningsprodukten n-propanol som detekterades var 300 mg/l i GB11 den 30 januari 2014. Samtliga analyser som illustreras i figur 9 hade halter över detektionsgränsen 10 mg/l. Den höga detektionsgränsen tillkommer på grund av spädning i metoden KMO-88 ALKOG. TOC-halterna var i de flesta fall högre än propylenglykolhalterna.

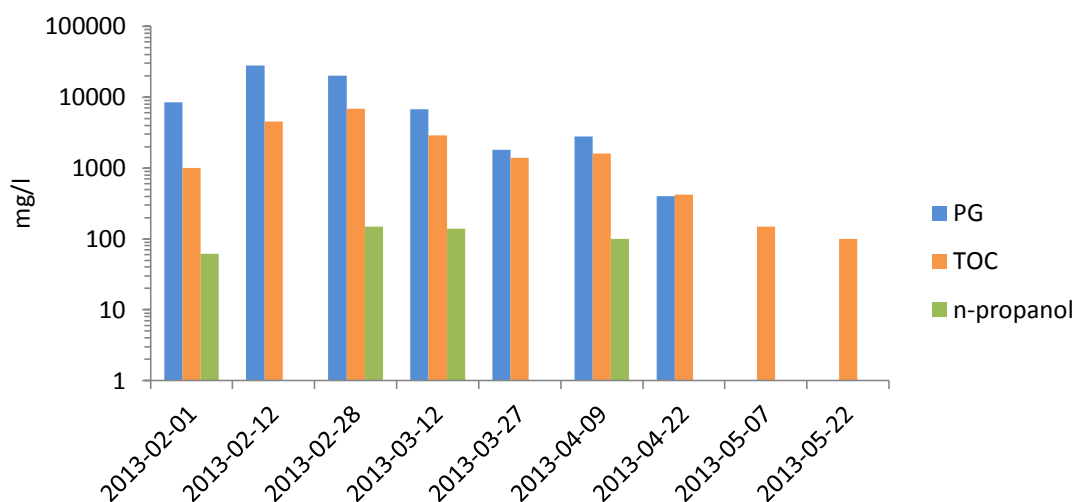
Propylenglykolen består viktmässigt av 47 % kol, vilket gör att 47 % av den uppmätta halten propylenglykol i figur 9-11, bidrar till TOC. Detta betyder att andra källor för

organiskt kol finns i vattnet. N-propanol detekterades vid alla tre proverna tagna i GB11 och i ett prov från GB09 under februari månad. Att ha i åtanke är att n-propanol inte är en stabil molekyl utan har relativt kort livslängd innan den oxideras vidare till propionat (se avsnitt 3.1.3).



**Figur 9** Stickprovers analysresultat i logaritmisk skala för n-propanol, TOC och propylenglykol (PG). Halter < 10 mg/l visas ej.

Analysen på prover tagna vid ledningssystemets utlopp till uppsamlingsdammen under avsningsperiod 2012-2013 illustreras i figur 10. Detektionsgränsen var 100 mg/l i analyserna på proverna tagna den 12 februari, 27 mars, 22 april och 7 maj. Resterande prover hade detektionsgräns 10 mg/l. I figur 10 kan man avläsa att n-propanol detekterats i prover tagna månaderna februari, mars och april. I analyserna i figur 10 är det tydligt att propylenglykolen borde bidra till en större del av TOC-halten i jämförelse med analyser illustrerade i figur 9.



**Figur 10** Analysresultat i logaritmisk skala för stickprover vid ledningssystemets utlopp 2013. Resultaten under 100 mg/l på dagar 12 februari, 27 mars, 22 april och 7 maj visas ej.

Analysen på prover tagna vid ledningssystemets utlopp under avisningsperiod 2013-2014 illustreras i figur 11.

Propylenglykolhalten i figur 11 bidrar även till en större del av TOC-halten i jämförelse med analysresultat i figur 9. Halterna av propylenglykol, TOC och n-propanol detekterade i utloppet 2012-2013 var generellt betydligt högre än halterna under 2013-2014.



**Figur 11** Analysresultat i logaritmisk skala för stickprover vid ledningssystemets utlopp 2013-2014. Detektionsgränsen var 100 mg/l i analysen på provet taget den 13 februari och visas ej.

Samtliga analysresultat som illustreras i figur 9 till 11 återfinns i appendix C.

### 5.2.2 Avisningsvätskans kemiska sammansättning

Analysresultat på prov av typ I avisningsvätska Safewing® MP I ECO PLUS (80) presenteras i tabell 5. Analysresultaten visar att provet innehåller ungefär 40 viktprocent propylenglykol dock är mätosäkerheten hög. Analyserna visade höga halter av totalfosfor och totalkväve i jämförelse med erhållen produktinformation (Clariant, 2013a) som visar < 1 ppm fosfor och < 2 ppm kväve.

**Tabell 5** Kemiskt innehåll av Safewing® MP I ECO PLUS (80)

| Analys av              | Resultat | Mätosäkerhet |
|------------------------|----------|--------------|
| propylenglykol (mg/l)  | 390000   | 30 - 50 %    |
| etylenglykol (mg/l)    | 1600     | 30 - 50 %    |
| n-propanol (mg/l)      | <1       | 30-50 %      |
| TOC (mg/l)             | 140000   | ±21000       |
| fosfor total, P (mg/l) | 28       | ±4,2         |
| kväve total, N (mg/l)  | 45       | ±6,8         |

### 5.2.3 TOC-mätning med kyvettmetod

Mätningarna av TOC som utfördes med HACH LANGE:s kyvettmetod LCK 386 och LCK 387 presenteras i tabell 6. Resultaten visade att det fanns organiskt kol i proverna, med högre halter i GB09 än i GB05.

**Tabell 6** Analysresultat av TOC från kyvettmetod, 4 februari 2014.

| Pumpgröp | TOC [mg/l] |
|----------|------------|
| GB05     | 579        |
| GB09     | 1004       |

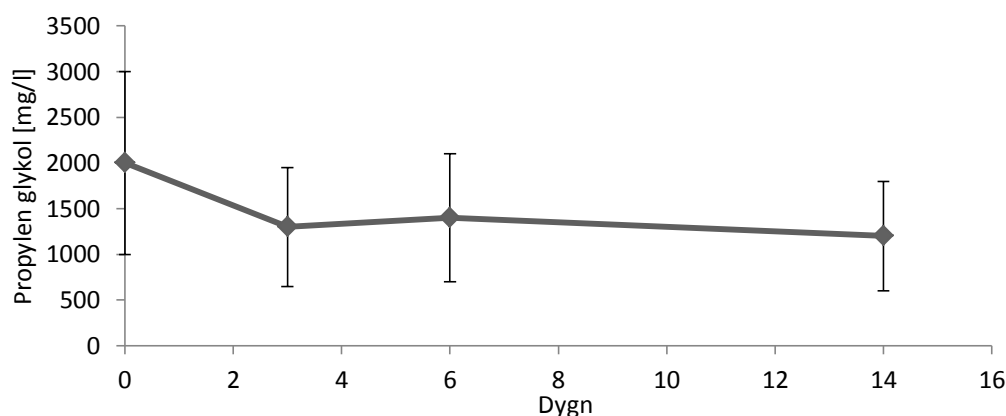
Dessa analysresultat liknade analysresultaten för TOC på prover tagna under nedbrytningsförsöket dag 0 (se avsnitt 5.3.2). Analyserna utförda på ALcontrol med den ackrediterade metoden SS-EN 1484-1 anses dock vara mer tillförlitliga än HACH LANGE:s kyvettmetoder.

## 5.3 NEDBRYTNINGSFÖRSÖK

I nedbrytningsförsöket analyserades propylenglykol, TOC, syrehalt, totalfosfor och totalkväve under en 14-dagarsperiod. Analysresultaten presenteras i detta avsnitt. Samtliga analysresultat från nedbrytningsförsöket återfinns i appendix C.

### 5.3.1 Propylenglykol

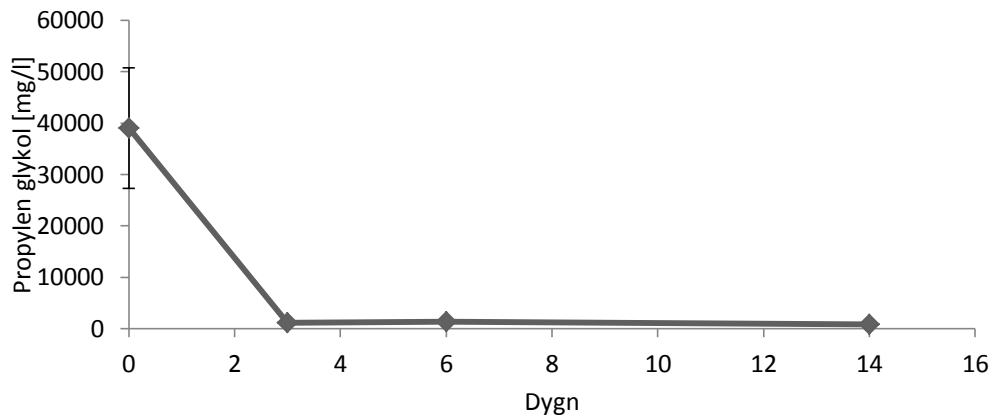
Mätningarna av propylenglykol i provvattnet hade hög mätosäkerhet, 30 - 50 % (Wigilius, 2014, pers.medd. ). Detta styrks av de olika analysresultaten erhållna för dag 0 där halten propylenglykol bör vara densamma då analyserna utförts på samma vatten. Samtliga propylenglykolmätningar förutom GB09, vid 14 °C (figur 17), visar en nedåtgående trend och har störst reducering mellan dag 0 och dag 3. Utan att räkna med mätosäkerheten reduceras mängden propylenglykol med 57 mg/l/dag för GB05 mellan dag 0 och 14, vid 0,2 °C (figur 12). Med mätfel 50 % inräknat är maximala minskningen 171 mg/l/dag och minimum 0 mg/l/dag.



**Figur 12** Propylenglykolhalt i vatten från GB05 vid 0,2 °C, felstaplar visar ±50%.

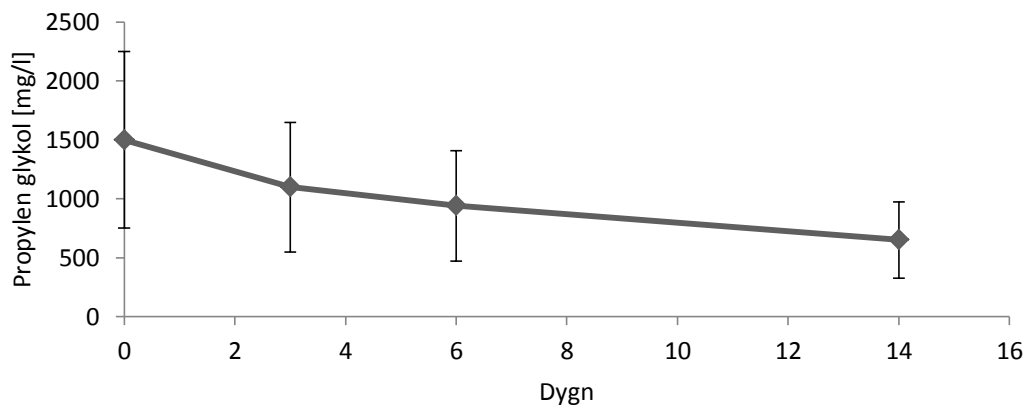
Mätningen som redovisas för dag 0 i figur 13 var enligt Bo Wigilius på ALcontrol ett mätfel. Beräknat utan detta mätfel från dag 3 till dag 14 sker en minskning med 30

mg/l/dag för GB05, vid 5,2 °C (figur 13). Med mätfel på 50 % inräknat är maximala minskningen 124 mg/l/dag och minimum 0 mg/l/dag.



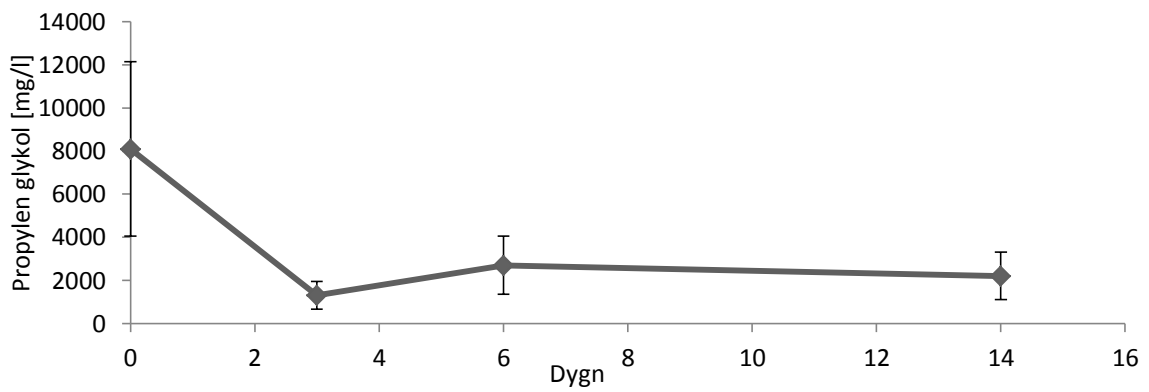
**Figur 13** Propylenglykolhalt i vatten från GB05 vid 5,2 °C, felstaplar visar  $\pm 50\%$ .

Utän att räkna med mätfelet minskar mängden propylenglykol med 61 mg/l/dag för GB05, vid 14,7 °C (figur 14). Med mätfel 50 % inräknat är maximala minskningen 138 mg/l/dag och minimum 0 mg/l/dag.



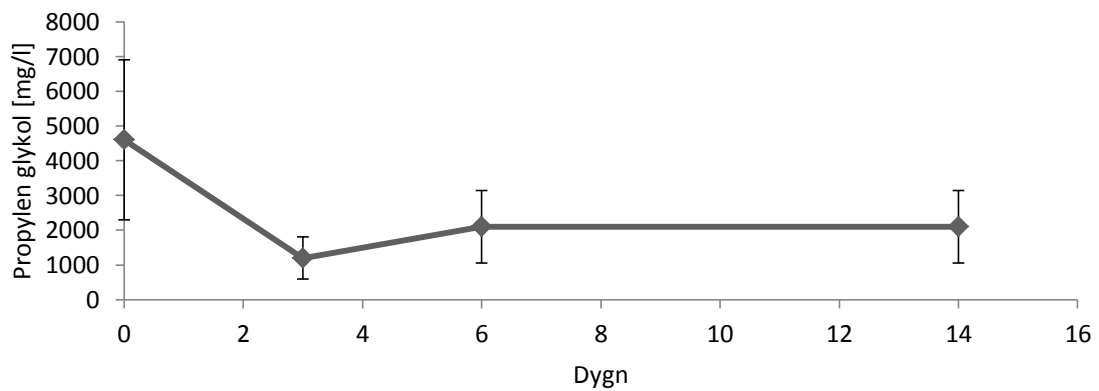
**Figur 14** Propylenglykolhalt i vatten från GB05 vid 14,7 °C, felstaplar visar  $\pm 50\%$ .

Utän att räkna med mätosäkerheten minskar mängden propylenglykol med 421 mg/l/dag för GB09, vid 0,2 °C, (figur 15). Med mätfel 50 % inräknat är den maximala reduceringen 789 mg/l/dag och minimum 53 mg/l/dag.



**Figur 15** Propylenglykolhalt i vatten från GB09 vid 0,2 °C, felstaplar visar  $\pm 50\%$ .

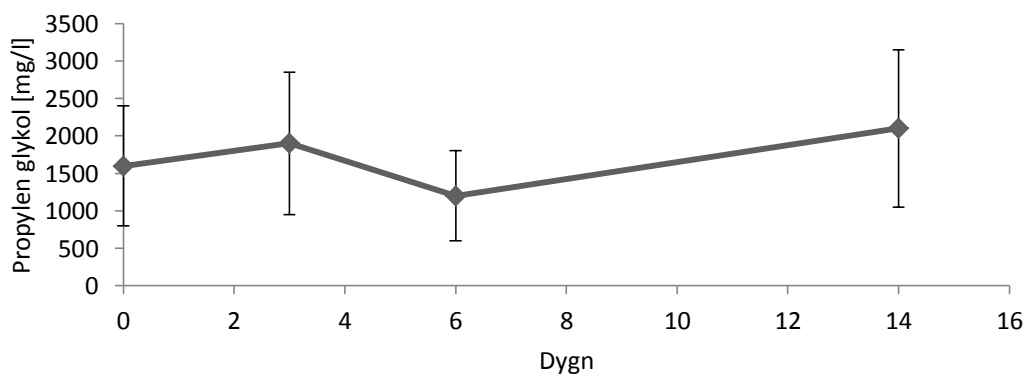
I beräkning utan mätfelet minskar mängden propylenglykol med 178 mg/l/dag för GB09, vid 5,2 °C (figur 16). Med mätfel 50 % inräknat är maximala minskningen 418 mg/l/dag och minimum 0 mg/l/dag.



**Figur 16** Propylenglykolhalt i vatten från GB09 vid 5,2 °C, felstaplar visar  $\pm 50\%$ .

Utän mätfelet reduceras mängden propylenglykol med 0 mg/l/dag för GB09, vid 14,7 °C (figur 17) . Med mätfel 50 % inräknat är maximala redueringen 96 mg/l/dag.



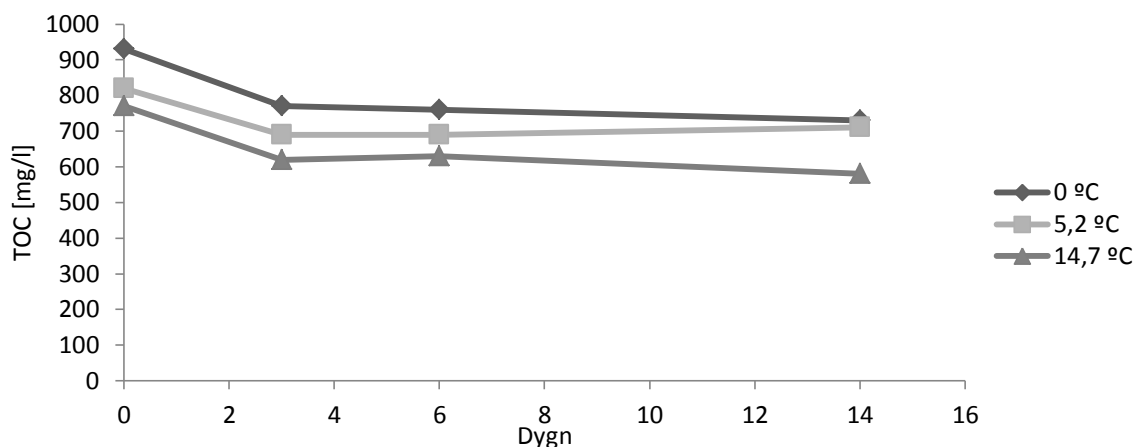


**Figur 17** Propylen glykolhalt i vatten från GB09 vid 14,7 °C, felstaplar visar  $\pm 50\%$ .

### 5.3.2 TOC

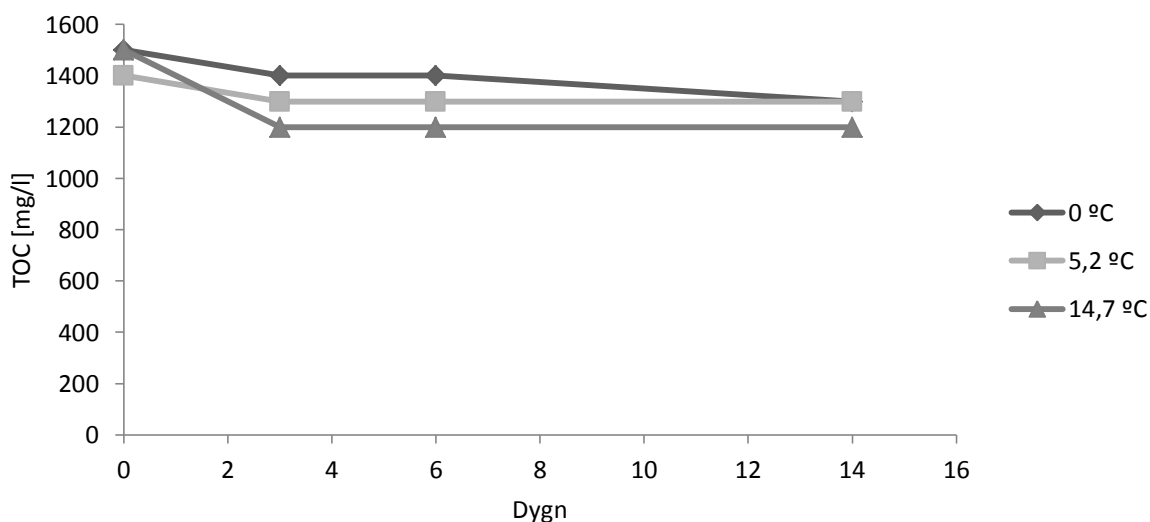
Mätosäkerheten ca 15% för TOC-analysen var betydligt mindre än för propylen glykol-analysen då en annan analysmetod användes, mätosäkerheten presenteras tillsammans med rådata i appendix C, tabell C3. Samtliga provserier visar en nedåtgående trend förutom GB05, vid 5 °C, (figur 18). I samtliga prover sker den största reduktionen av TOC mellan dag 0 och dag 3.

Reduceringen av TOC i vattnet från GB05 som presenteras i figur 18 var, 14 mg/l/dag vid 0 °C. För 5 °C var reduktionen av TOC 4,3 mg/l/dag och vid 14,7 °C var reduktionen 13,6 mg/l/dag. Detta är medelvärdet av TOC-reduktionen för varje dag räknat över hela fjortondagarsperioden.



**Figur 18** TOC-halt i vatten från GB05 för temperaturerna 0 °C, 5,2 °C och 14,7 °C.

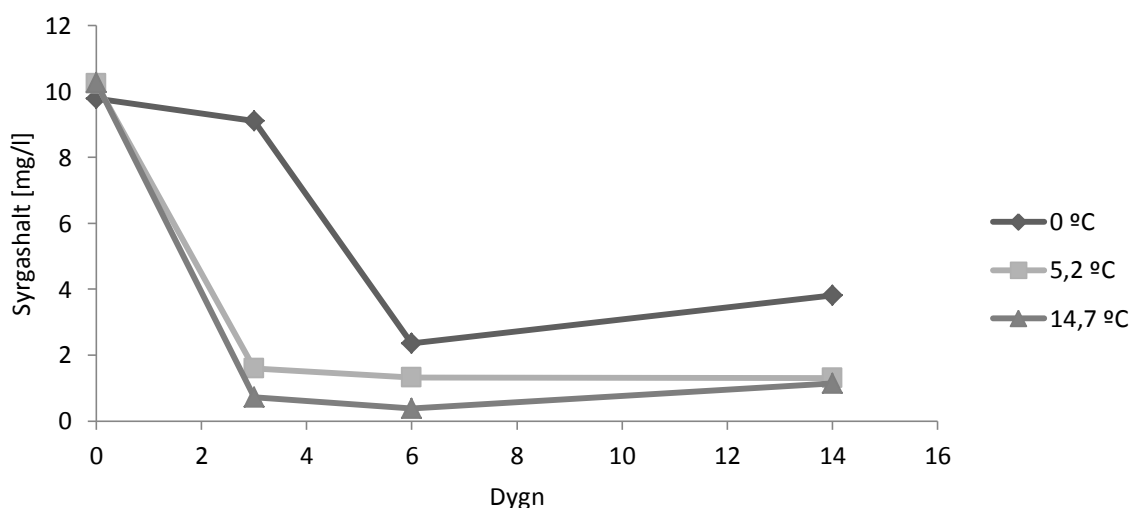
Likt TOC i GB05 var reduktionen av TOC i GB09 (se figur 19) mest påtaglig mellan dag 0 och dag 3. Beräknat över hela fjortondagarsperioden var reduktionen 14,3 mg/l/dag vid 0 °C. För 5,2 °C var reduktionen av TOC, 7,2 mg/l/dag och för 14,7 °C, 21,4 mg/l/dag.



**Figur 19** TOC-halt i vatten från GB09 för temperaturerna 0 °C, 5,2 °C och 14,7 °C.

### 5.3.3 Syrgashalt

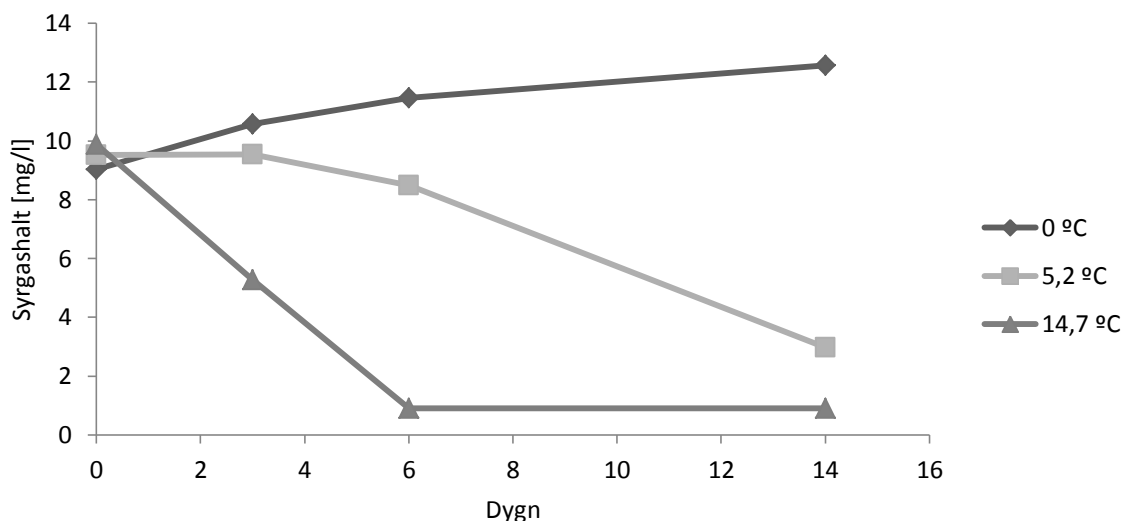
Syrgashalten visade en nedåtgående trend i alla fall förutom GB09, vid 0 °C där syrgashalten ökade stadigt. I figur 20 presenteras syrgashalten i GB05 under fjortondagarsperioden. Lägg märke till sambandet mellan temperaturen och syrgashalt i figur 20. Vid lägre temperaturer reducerades syrgashalten mindre. Speciellt intressant i figur 20 är de låga syreförändringarna för 0 °C mellan dag 0 och dag 3 som sedan mellan dag 3 och dag 6 reduceras från 9,1 mg/l till 2,3 mg/l. Den maximala syremättnaden är 14 mg O<sub>2</sub> per liter vid 0 °C.



**Figur 20** Syrgashalt i vatten från GB05

Syrgashalten reducerades mer i vattnet från GB05 än vad det gjorde i vattnet från GB09 som presenteras i figur 21. Den största reduktionen av syre var i GB05, 14,7 °C mellan dag 0 och dag 6. För GB05, vid 5 °C reducerades inte syret mellan dag 0 och dag 3 utan

reduceringen tilltog först mellan dag 3 och dag 6. För 0 °C ökade syrgashalten stadigt under försökets alla fjorton dagar.



Figur 21 Syrgashalt i vatten från GB09

### 5.3.4 Fosfor och kväve

Analyserna av fosfor med metod SS-EN ISO 15681-2:2005 presenteras i tabell 7. Fosforhalten i GB05 reduceras mellan dag 0 och 14. Så är inte fallet för fosforhalten i GB09.

Tabell 7 Totalfosfor i vatten från GB05 och GB09 vid 5,2 °C.

|                     | Dag 0     | Dag 3     | Dag 14    |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| GB05, totalP (µg/l) | 320 (±48) | 260 (±39) | 210 (±32) |
| GB09, totalP (µg/l) | 260 (±39) | 280 (±42) | 280 (±42) |

Kväveanalyserna utförda med SS 028101-1(Devardas) presenteras i tabell 8. Tyvärr kunde inte analyserna från dag 0 utföras på grund av för liten provvolym då replikat utfördes i andra analyser av vattnet. Kvävehalterna reducerades i vattnet från båda pumpbrunnarna mellan dag 3 och dag 14.

Tabell 8 Totalkväve i vatten från GB05 och GB09 vid 5,2 °C

|                     | Dag 3      | Dag 14     |
|---------------------|------------|------------|
| GB05, totalN (µg/l) | 3400(±510) | 1400(±210) |
| GB09, totalN (µg/l) | 2200(±330) | 1500(±230) |

### 5.4 ACKUMULERINGSTID I PUMPGROPAR

Samtliga ackumuleringstider i GB05 och GB09 presenteras i appendix A. I GB05 var det under perioden från 1 oktober 2013 till den 30 februari 2014 totalt 30 tillfällen där vattnet uppehöll sig i pumpbrunnen längre än 24 timmar. Den längsta ackumuleringstider under perioden var 443 timmar mellan den 13 januari till den 30 januari. Medelackumuleringstiden under perioden var 74 timmar. Då har inte ackumuleringstider kortare än 24 timmar tagits med i beräkningarna.

Samma period 2012-2013 var det 25 tillfällen då vattnet uppehölls längre än 24 timmar. Den längsta ackumuleringstiden var under denna period 313 timmar mellan 15 januari och 28 januari. Medelackumuleringstiden för perioden var 115 timmar.

I GB09 var det under perioden från 1 Oktober 2013 till den 30 februari 2014 totalt 27 tillfällen då vattnet uppehöll sig längre än 24 timmar. Medelackumuleringstiden var 126 timmar. Den längsta ackumuleringstiden var 499 timmar och inträffade mellan 10 januari och 31 januari.

I GB09 under samma period 2012-2013 var det endast 12 tillfällen då vattnet uppehölls längre än 24 timmar. Av dessa var medelackumuleringstiden 260 timmar och den längsta tiden som vattnet uppehölls var 669 timmar mellan 30 januari till den 27 februari.

## 5.5 UPPSKATTNING AV NEDBRYTNING I B-GLYKOLSYSTEMET

Resultaten från beräkningsmodellen för avisningsperioden 2013-2014 presenteras i tabell 9. Ur tabell 9 kan det utläsas att en större mängd propylenglykol uppskattas brytas ned i GB 09 än i GB05. Detta är också fallet för avisningsperioden 2012-2013 (tabell 10). Nedbrytningshastigheter och beräkningsmodellen förklaras i avsnitt 4.7.

Tabell 9 Beräkningsmodellens resultat för nedbruten mängd propylenglykol i GB05,GB09 och för hela B-glykolsystemet (exklusive uppsamlingsdammen och utjämningsdamm vid ramp M), **2013 - 2014**.

| Period<br>1 Okt – 1 Mars | Nedbrytnings-<br>hastighet<br>[mg/l/dygn] | Nedbruten<br>propylenglykol i<br>enskild brunn<br>[liter] | Totalt nedbrutet med<br>uppskattning för<br>resterande brunnar<br>[liter] |
|--------------------------|---|---|---|
| GB05                     | 25  | 30  | 90  |
| GB09                     | 20  | 363   | 1089  |
| Totalt                   |   |   | 1179  |

**Tabell 10** Beräkningsmodellens resultat för nedbruten mängd propylenglykol i GB05,GB09 och för hela B-glykolsystemet (exklusive uppsamlingsdammen och utjämningsdamm vid ramp M), **2012-2013**.

| Period<br>1 Okt – 1 Mars | Nedbrytnings-<br>hastighet<br>[mg/l/dygn] | Nedbruten<br>propylenglykol i<br>enskild brunn<br>[liter] | Totalt nedbrutet med<br>uppskattning för<br>resterande brunnar<br>[liter] |
|--------------------------|---|---|---|
| GB05                     | 25  | 42  | 126   |
| GB09                     | 20  | 330   | 990   |
| Totalt                   |   |   | 1116  |

Uppskattad nedbrytning av propylenglykol relaterat till den totala använda mängden propylenglykol under samma period (se appendix A, tabell A5 och A6) presenteras i tabell 11. Det bör understrykas att av den totala mängden propylenglykol som används

vid Stockholm Arlanda flygplats uppsamlas endast en del i B-glykolsystemet. Stora delar samlas även upp som A-glykol med uppsamlingsfordon. Resultatet visar att cirka en till tre tusendelar av den totala använda propylenglykolen uppskattas brytas ned i B-glykolsystemets pumpbrunnar och utjämningsmagasin. Uppsamlingsdamm samt damm vid ramp M är inte med i uppskattningen.

**Tabell 11** Uppskattad nedbruten mängd propylenglykol mot den totala användningen

| Period         | Använd mängd propylenglykol<br>[ton] | Uppskattad nedbruten propylenglykol<br>[ton] | Andel nedbruten propylenglykol<br>[%o] |
|----------------|--------------------------------------|--|--|
| 1 Okt – 1 Mars |                                      |  |  |
| 2013 - 2014    | 478                                  | 1,23   | 2,57                                   |
| 2012 - 2013    | 1228                                 | 1,16   | 0,94                                   |

## 6. DISKUSSION

Syftet med studien har varit att bestämma om det sker en nedbrytning av propylenglykoler i B-glykolsystemet vid Stockholm Arlanda flygplats samt uppskatta nedbrytningens omfattning. Förekomsten av n-propanol i både pumpbrunnar och i utloppet är ett starkt bevis på att nedbrytning äger rum i B-glykolsystemet.

### 6.1 SKER DET EN NEDBRYTNING AV GLYKOL I B-GLYKOLSYSTEMET?

Analysresultat från vattenprover både i fält och från nedbrytningsfösocket samt mättningsresultat och förekomst av biofilm i pumpbrunnarna indikerar att det sker en nedbrytning.

#### 6.1.1 N-propanol

Förekomsten av nedbrytningsprodukten n-propanol i B-glykolsystemet (figur 9-11) i såväl pumpbrunnar som vid utloppet styrker att en nedbrytning av propylenglykol sker då inga andra kända källor av n-propanol är närvarande i dagvattensystemet. Det är viktigt att belysa n-propanols korta "livslängd" som är 5-15 dagar innan de oxideras till propionat (Schoenberg m.fl., 2000; Veltman m.fl., 1998; Gooden, 1998). Det är därför svårt att relatera dessa resultat till nedbrytningens omfattning.

Förekomsten av n-propanol även vid de kallaste månaderna tyder på att nedbrytning av propylenglykol kan ske under avisningsperiodens alla månader. Dock visade analyserna från vatten i utloppet från ledningssystemet till uppsamlingsdammen (se figur 10-11) inte några n-propanolförekomster i februari. Detta kan bero på att n-propanol oxiderats till propionat eller att ingen nedbrytning har ägt rum. Dessa prover och många andra (se avsnitt 5.2.1) hade en hög detektionsgräns på 100 mg/l (appendix C, tabell C1-C2) så även i dessa prov kan n-propanol existerat.

#### 6.1.2 Temperatur

Temperaturmätningarna är utförda under den vanligtvis kallaste månaden på året. Vid avisningsperiodens start och slut är förmodligen temperaturen i B-glykolsystemet betydligt högre vilket bör öka nedbrytningen vid dessa perioder på grund av temperaturens stora påverkan på nedbrytningsprocessen. Ett tydligt samband kan avläsas mellan utpumpning av vatten och när nytt vatten tillkommer med sjunkande temperaturer (figur 6 – 7). När vattnet sedan uppehålls i pumpbrunnen stiger temperaturen kontinuerligt. Den ökade temperaturen beror på att vattnet blir stillastående och värms upp av omgivningen. Dessa temperaturökningar gynnar en eventuell nedbrytningsprocess men är ingen indikation på att nedbrytning sker. De extrema topparna man kan se från temperaturmätningarna i GB11 (figur 7) beror med största sannolikhet på att temperaturgivaren befunnit sig ovan vatten vid utpumpning.

#### 6.1.3 Syrehalt i pumpbrunnarna

Syremätningarna tagna den 28 januari (se tabell 4) visar låga värden i samtliga brunnar. Detta beror på att mätningarna utfördes i slutet av den längsta ackumuleringstiden (se appendix A, tabell A1 och A3) av vatten under 2013-2014. Mätningar av syre i GB05

som utfördes alldeles i studiens början, nio dagar innan denna mätning, visade att vattnet i GB05 var näst intill syrefritt.

Nederbörd mellan 22-24 januari syresatte dock vattnet med ett fåtal mg syre per liter på grund av det syre som finns i regnvattnet samt den turbulens som sker i brunnen när nytt vatten tillkommer. Den 26 februari (se tabell 4) uppmättes i GB05 den lägsta syrehalten i slutet på en 113 timmar lång ackumuleringstid och låga syrehalter uppmättes även i GB09. Sjunkande syrehalter när vattnet uppehålls styrker att en nedbrytning äger rum (Gooden, 1998; Torstensson, 2014, pers. medd. ).

Dessa mätningar visar att delar av B-glykolsystemet, speciellt GB05 periodvis kan vara helt syrefria på grund av aerob nedbrytning, vilket skulle kunna bidra till anaerob nedbrytning och förklara den stickande lukt som ofta kunde kännas vid GB05. Denna lukt beror enligt Gooden (1998) och Torstensson (2014, pers. medd. ) på de organiska syror som är restprodukter i anaerob nedbrytning.

#### **6.1.4 Visuella indikationer**

Förekomsten av biofilmer samt ytbubblor indikerar starkt att nedbrytning sker i systemet. Enligt en teori av Torstensson (2014, pers. medd.) beror den brandgula färgen hos biofilmen på att avisningsvätskan är brandgul. Det finns mikroorganismer som tillverkar polysackarider som kan liknas med gelatin. Gelatinet kan färgas in av det brandgula färgämnet i avisningsvätskan. Biofilmen påminner mycket om gelatin (se appendix B, figur B3)

Bubblorna på ytan är troligen den koldioxid som skapas vid aerob nedbrytning (se reaktion 1). Det är mycket möjligt att även metan från metanogena anaeroba processer eller kvävgas från nitratreducerande processer (se tabell 3) skulle skapa bubblor vid ytan men då krävs en helt syrefri miljö.

Det är dock mycket möjligt att bottenvattnet i pumpbrunnar är helt syrefria och att det där kan ske anaeroba nedbrytningsprocesser samtidigt som aeroba processer sker vid ytvattnet. Pumpbrunnen GB05 är en plats i B-glykolsystemet där troligen anaeroba processer kan äga rum på grund av de låga syrehalter som uppmätts där.

#### **6.1.5 Avisningsvätskans kemiska innehåll**

Resultaten vid analysen av Safewing® MP I ECO PLUS (80) (se tabell 5) visade högre fosfor- och kvävehalter än väntat vilket är en extra källa av näringsämnen. Enligt Gooden (1998) är dessa näringsämnen av stor betydelse för nedbrytningsprocessen speciellt i mikroorganismernas celledelningsprocess. Kväve- och fosformätningar utfördes även under nedbrytningsförsöket och diskuteras vidare i avsnitt 6.1.6.

#### **6.1.6 Nedbrytningsförsök**

Det är inte möjligt att exakt simulera den verkliga nedbrytningen av propylenglykol i pumpbrunnar i ett laboratorium, då faktorer såsom omblandning och temperaturförändringar är näst intill omöjlig att efterlikna. Trots detta kunde mycket information om propylenglykolens nedbrytning erhållas genom nedbrytningsförsöket.

Den största faktorn som skiljde nedbrytningsförsöket från verkligheten är den biofilm av mikroorganismer som hittats på brunn- och rörväggar vilken bör öka nedbrytningen. Även andra faktorer som temperaturvariationer och turbulens skiljer sig.

Nedbrytningsförsökets oackrediterade analysmetod ALKOG som analyserar propylenglykol visade sig ha stora brister med en uppskattad mätosäkerhet på 30 - 50 % (Wigilius,2014, pers. medd.). Analyserna av proverna tagna dag 0 bör vara näst intill identiska då de togs vid samma tidpunkt i samma vatten men analysresultaten visar väldigt skilda propylenglykolhalter. Inga utförliga beräkningar för mätosäkerheten har gjorts av ALcontrol utan endast uppskattningar (Wigilius,2014, pers. medd.). Därmed kan mätosäkerheten mycket väl vara högre i vissa prover vilket analysresultaten även antyder. På grund av dessa analysresultat utförde ALcontrol omanalyser för propylenglykol två veckor efter de första analyserna, efter det att proverna förvarats i kylskåp (6 °C). Dessa resultat kunde dock inte användas på grund av nedbrytningsförsökets starka tidsberoende.

På grund av detta kunde inte pålitliga specifika nedbrytningshastigheter vid olika temperaturer erhållas för att användas i beräkningsmodellen. Resultaten från nedbrytningsförsöket (se figur 12-17) antyder dock att en nedbrytning av propylenglykol har ägt rum då många av provserierna har nedåtgående trender av propylenglykolhalt. Men på grund av den höga mätosäkerheten går det inte att statistiskt säkerställa.

TOC-mätningarna (se figur 18-19) var mer pålitliga och visar att det totala organiska kolek i vattnet sjunker med tiden. Analysresultaten visade värden liknande de som erhöles från TOC-analysen med kyvettnetod (se avsnitt 5.2.3). TOC är dock ett trubbigt verktyg för att bestämma nedbrytningshastigheter av propylenglykol då andra kolsubstanser finns i vattnet. När tillväxt av mikroorganismer sker vid nedbrytning av propylenglykol kan även detta påverka TOC eftersom mikroorganismerna är uppbyggda av organiskt kol (Gooden, 1998). Den nedåtgående trenden i figur 18-19 indikerar dock att en nedbrytning av organiskt kol i vattnet ägt rum.

Syremätningarna (se figur 20-21) visar att syre förbrukades i samtliga 2,5 liters kärl förutom GB09 0 °C vilket tyder på att en aerob nedbrytning ägt rum i resterande kärl (Gooden, 1998; Torstensson, 2014). Ett tydligt samband mellan syrehalten och temperaturen kan avläsas i både figur 20 och figur 21. Plastkärlen omskakades innan varje provtagning och detta ökade syrehalten i vattnet med cirka 2 mg/l. Detta borde även påverkat nedbrytningen av propylenglykol genom att mer elektronacceptorer fanns tillgängligt för mikroorganismer. En naturlig omblandning och luftning av vattnet sker även i pumpbrunnarna när nytt vatten tillrinner brunnen. Hur stor denna naturliga syresättning är har inte undersökts i denna studie.

Resultaten från fosfor- och kväveanalyserna (se tabell 7) tyder på att dessa näringsämnen förbrukats men inte begränsat nedbrytningsprocessen. Detta tyder på att dessa näringsämnen inte är begränsande i B-glykolsystemet. Dock måste ytterligare mätningar av fosfor och kväve utföras i fält för att säkerställa detta.



## 6.2 HUR STOR ÄR NEDBRYTNINGEN?

För att försöka svara på detta diskuteras beräkningsmodellens resultat i detta avsnitt. Det har dock varit svårt att dra konkreta slutsatser från uppskattningen då det är så många olika faktorer som påverkar storleken på nedbrytningen.

### 6.2.1 Beräkningsmodell

Nedbrytningsmodellens resultat (tabell 9-11) utifrån ackumuleringstider presenterade i appendix A skall ses som en potentiell nedbrytning. Det är viktigt att belysa att detta är en uppskattning med många grova antaganden relaterade till B-glykolsystemet, nedbrytningshastigheter och vattenvolymer. Ingen modell är sann men vissa är användbara och resultatet från denna beräkningsmodell ger en indikation på vilken storlek nedbrytningen i B-glykolsystemets pumpbrunnar har.

Det är viktigt att tillägga att beräkningsmodellen inte uppskattat nedbrytningen i uppsamlingsdammen eller utjämningsdamm vid ramp M. Endast nedbrytningen i pumpbrunnar och utjämningsmagasin under mark har uppskattats. Eftersom nedbrytningsprocessen i B-glykolsystemet är dynamisk på grund av att många faktorer spelar in såsom propylenglykolkoncentrationen och omblandning kan beräkningsmodellens resultat vara en underskattning eller överskattning.

Fasta nedbrytningshastigheter har används i modellen vilket inte reflekterar verkligheten då nedbrytningshastigheten varierar beroende på halt propylenglykol, temperatur och begränsande faktorer såsom syrehalt och tillgång på näringsämnen. Vid ett fåtal tillfällen har extremt höga mängder propylenglykol uppmätts i B-glykolsystemet, runt 30000 mg/l, och detta skulle öka nedbrytningshastigheten markant. Tillfällen som dessa har inte tagits med i beräkningsmodellen. Syremätningar i tabell 4 visar att vissa pumpbrunnar i B-glykolsystemet periodvis kan vara näst intill syrefria vilket helt stannar av den aeroba nedbrytningen. Dock kan anaeroba nedbrytningsprocesser ta vid eller ske samtidigt i bottenvatten under förutsättning att detta vatten är helt syrefritt och ytvattnet syresätts.

Akkumuleringstiderna som används i beräkningsmodellen är endast de ackumuleringstider i pumpbrunnarna som är 24 timmar eller längre för att annars hade över ett tusental korta ackumuleringstider fått bearbetats vilket inte var möjligt på grund av studiens tidsbegränsning. Dessa korta ackumuleringstider bidrar självfallet till den totala nedbrytningen i pumpbrunnarna men en betydligt mindre del på grund av lagfasen (se avsnitt 3.3.5) i mikroorganismers aktivitet. Dock är det möjligt att lagfasen förkortas eller inte ens är av betydelse på grund av de biofilmer som hittats i B-glykolsystemet och att allt vatten inte pumpas ut från brunnarna vid utpumpning.

Resultaten från ackumuleringstiderna i GB05 och GB09 har används för att uppskatta resterande pumpbrunnars bidrag till nedbrytningen vilket är ett grovt antagande. Dessa brunnar har självklart andra ackumuleringstider trots deras liknande volymer, på grund av olika stora avrinningsområden och nivåinställningar för utpumpning.

Propylenglykolhalter i pumpbrunnarna skiljer sig även på grund av hur mycket avisningar som sker vid avrinningsytor som tillrinner brunnen i fråga.

När nedbrytningshastigheter utifrån analysresultat från nedbrytningsförsöket (figur 12-18) beräknades blev resultatet betydligt högre nedbrytningshastigheter än de som baserats på litteratur. För att göra detta togs en outlier bort på analysresultat i figur 13 och ett medelvärde av startkoncentrationen beräknades. När dessa nedbrytningshastigheter kördes i beräkningsmodellen uppskattades nedbrytningen att vara ungefär tio gånger större än de tidigare resultaten (tabell 11). Tyvärr är detta värden baserade på analysresultat med hög mätosäkerhet och kan därför inte användas för att dra konkreta slutsatser.

### 6.3 FÖRSLAG TILL VIDARE STUDIER

För att mer konkret bedöma omfattningen av nedbrytningen behöver vidare studier utföras med modeller baserade på stora dataserier med temperatur, propylenglykolkoncentrationer, näringsämnen och syrehalter. Modellen bör även ta hänsyn till faktorer såsom omblandning och mikrobiologiska faktorer rörande olika stammar av propylenglykolnedbrytande mikroorganismer.

Vidare studier om anaeroba processer äger rum i B-glykolsystemet bör utföras och nedbrytningen bör undersökas i resterande delar av B-glykolsystemet såsom uppsamlingsdammen och utjämningsdammen vid ramp M. B-glykolsystemets pumpbrunnar är inte den enda plats vid Stockholm Arlanda flygplats där nedbrytning av propylenglykol kan äga rum. Nedbrytningen äger med stor sannolikhet rum även i:

- ❖ Uppsamlingsdamm för B-glykolsystemet
- ❖ Fördröjningsdamm vid ramp M
- ❖ Snötipp
- ❖ Diken
- ❖ På hårdgjorda ytor
- ❖ Förvaring av A-glykol
- ❖ Markprofil runt landningsbanor och avisningsytor

Utanför Arlanda bör även nedbrytning ske vid transportsträckor till reningsverk, i själva reningsverken och nedströms i vattendrag såsom Märstaån. Under litteraturstudien påträffades ett antal studier rörande nedbrytning av propylenglykol i markprofil vid flygplatser samt på hårdgjorda ytor, vilket troligen är platser där omfattande nedbrytning äger rum. Snötippen bör innehålla stora mängder propylenglykol under avisningsperioder med mycket snö. Då ackumuleras stora mängder avisningsvätskor i snön i stället för att avrinna till pumpbrunn vid avisningsplatser.

## 7. SLUTSATSER

Det kan med stor säkerhet fastställas att aerob nedbrytning av propylenglykol äger rum i B-glykolsystemet och att detta även kan ske under avisningsperiodens kallaste månader. Denna slutsats styrks genom förekomst av nedbrytningsprodukten n-propanol vid analyser av vatten från utlopp och pumpbrunnar. Reducerade syrehalter uppmätta i B-glykolsystemet där vattnet haft längre ackumuleringstid samt reducerade syre och TOC-halter i nedbrytningsförsöket stärker denna slutsats.

Omfattningen av nedbrytningen uppskattades mellan 1 till 2,5 promille av den totala använda propylenglykolen. Detta ger en indikation på storleksordningen av nedbrytningen i B-glykolsystemets pumpbrunnar, men kan inga konkreta slutsatser kan dras rörande nedbrytningens omfattning på grund av beräkningsmodellens många osäkra antaganden.

## 9. REFERENSER

CampbellSci (2014), [Online], Available: <http://www.campbellsci.com/pc200w> [14 May 2014].

Camp, Dresser and Mckee (CDM) (1997) Water quality conditions and sources of pollution in the greater Milwaukee watersheds, *Southeastern Wisconsin regional planning commission*, vol. 2.

Clariant (2013a) Produktblad: Safewing MP I ECO PLUS (80).

Clariant (2013b) Produktblad: Safewing MP II Flight.

Cornell, J., Pillard, D. and Hernandez, M. (2000) Comparative measures of the toxicity of component chemicals in aircraft deicing fluid, *Environmental toxicology and chemistry*, vol. 19, no. 6, pp. 1465 - 1472.

Corsi, S.R., Booth, N.L. and Hall, D.W. (2001) Aircraft and runway deicers at General Mitchell International Airport, Milwaukee, Wisconsin, USA. 1. Biochemical oxygen demand and dissolved oxygen in receiving streams, *Environmental toxicology and chemistry*, vol. 20, no. 7, pp. 1474 - 1482.

Corsi, S.R., Mericas, D. and Bowman, G.T. (2012) Oxygen Demand of Aircraft and Airfield Pavement Deicers and Alternative Freezing Point Depressants, *Water, air, and soil pollution*, vol. 223, no. 5, pp. 2447 - 2461.

EPA (2000) *Airport deicing operations*, [Online], Available: [http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/airport/upload/2005\\_10\\_07\\_guide\\_airport\\_airport.pdf](http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/airport/upload/2005_10_07_guide_airport_airport.pdf) [25 Feb 2014].

Gooden, W.J. (1998) Biodegradation of propylen glycol-based MIL-A8243D Aircraft deicer, *Department of chemical and bioresource engineering, Colorado*.

Greco, G., Toscano, G., Giuseppe, M.L., Rao, M.A., Andreoni, V., Cavalca, L., Libisch, B., French, H., Hartnik, T., Anton, A. and Biró, B. (2012) Evaluation of remediation techniques – Part 1: Gardermoen site, *SoilCAM*.

Jaesche, P., Totsche, K.U. and Kögel-Knabner, I. (2006) Transport and anaerobic biodegradation of propylene glycol in gravel-rich soil materials, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 85, no. 3-4, pp. 271–286.

Kemikalieinspektionen (2003), [Online], Available: <https://apps.kemi.se/flodessok/floden/kemamne/1,2-propandiol.htm> [01 Mar 2014].

Klecka, G.M., Carpenter, C.L. and Landenberger, B.D. (1993) Biodegradation of aircraft deicing fluids in soil at low temperatures, *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 25, no. 3, pp. 280 - 295.

Landberg, B. (2002) *Aircraft Icing AOPA*, Air Safety Foundation, Safety advisor Weather No.1, [Online], Available: [http://flighttraining.aopa.org/pdfs/SA11\\_Aircraft\\_Icing.pdf](http://flighttraining.aopa.org/pdfs/SA11_Aircraft_Icing.pdf) [12 Mar 2014].

Nationalencyklopedin (2014), [Online], Available: <http://www.ne.se/lang/gottr%C3%B6raolyckan> [15 Mar 2014].

Ramböll Sverige AB (2004) Dagvattenledning i B-glykolsystemet, systembeskrivning.

Schoenberg, T., Veltman, S. and Switzenbaum, M.S. (2000) Kinetics of anaerobic degradation of glycol-based Type I aircraft deicing fluids, *Biodegradation (Dordrecht)*, vol. 12, no. 1, pp. 59 - 68.

Seok, J. and Komisar, S.J. (2003) Integrated Modeling of Anaerobic Fluidized Bed Bioreactor for Deicing Waste Treatment. II: Simulation and Experimental Studies, *Journal of environmental engineering*, vol. 129, no. 2, pp. 110 - 122.

Swedavia (2013) Glykolhantering vid Stockholm Arlanda airport, Avisningsäsongen 2012-2013 .

Toscano, G., Cavalca, L., Colarieti, M.L., Scelza, R., Scotti, R., Rao, M.A., Andreoni, V., Ciccazzo, S. and Greco, G. (2012) Aerobic biodegradation of propylene glycol by soil bacteria, *Biodegradation (Dordrecht)*, vol. 24, no. 5, pp. 603 - 613.

Toscano, G., Colarieti, L. and Greco, G. (2012) Biodegradation of aircraft deicing fluids in soil slurries, *Chemical Engineering Transactions*, vol. 28, pp. 1 - 6.

*Vatten och samhällsteknik (2011)*, Miljökonsekvensbeskrivning för ansökan om nytt tillstånd enligt miljöbalken, kap 7 påverkan på vattensystem, [Online], Available: <http://www.swedavia.se/PageFiles/12035/7%20P%C3%A5verkan%20p%C3%A5%20vattensystem.pdf> [1 Mar 2014].

Veltman, S., Schoenberg, T. and Switzenbaum, M.S. (1998) Alcohol and acid formation during the anaerobic decomposition of propylene glycol under methanogenic conditions, *Biodegradation (Dordrecht)*, vol. 9, no. 2, pp. 113 - 118.

Willets, A. (1979) Bacterial metabolism of propane-1,2-diol, *BBA - General Subjects*, vol. 588, no. 3, pp. 302–309.

#### *Muntliga källor*

Johansson, Björn (2014), VA-ingenjör på Swedavia AB:s VA-enhet

Medelberg, Mats (2014), director of finance på Moose Aviation

Waernbaum, Ebba (2014), VA-ingenjör på Swedavia AB:s VA-enhet

Torstensson, Holger (2014), VA-konsult på Provab

Wigilius, Bo (2014), kvalitetschef på ALcontrol

## APPENDIX A

**Tabell A 1** Ackumuleringstider och vattennivåer GB05 2013-2014

| <b>Intervall</b>                    | <b>tid</b> | <b>h<sub>0</sub></b> | <b>h<sub>1</sub></b> | <b>Δ h</b> | <b>karaktär</b>        |
|-------------------------------------|------------|----------------------|----------------------|------------|------------------------|
|                                     | [h]        | [m]                  | [m]                  | [m]        |                        |
| 2013-10-05 23:00 - 2013-10-08 23:00 | 72         | 1,063                | 1,096                | 0,033      | flack                  |
| 2013-10-09 04:00 - 2013-10-10 15:00 | 33         | 0,797                | 1,212                | 0,415      | stigande kontinuerligt |
| 2013-10-10 16:00 - 2013-10-17 19:00 | 171        | 1,023                | 1,398                | 0,375      | flack                  |
| 2013-10-18 10:00 - 2013-10-22 09:00 | 95         | 1,085                | 1,477                | 0,392      | flack                  |
| 2013-10-24 01:00 - 2013-10-26 05:00 | 52         | 1,004                | 1,058                | 0,054      | flack                  |
| 2013-10-29 06:00 - 2013-10-31 15:00 | 57         | 1,211                | 1,308                | 0,097      | flack                  |
| 2013-11-01 18:00 - 2013-11-03 15:00 | 45         | 0,766                | 1,337                | 0,571      | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-05 16:00 - 2013-11-07 07:00 | 39         | 0,857                | 0,913                | 0,056      | flack                  |
| 2013-11-10 13:00 - 2013-11-12 07:00 | 42         | 0,922                | 0,942                | 0,02       | flack                  |
| 2013-11-13 09:00 - 2013-11-14 19:00 | 34         | 0,952                | 0,966                | 0,014      | flack                  |
| 2013-11-16 17:00 - 2013-11-19 04:00 | 59         | 0,932                | 0,971                | 0,039      | flack                  |
| 2013-11-22 06:00 - 2013-11-27 00:00 | 114        | 1,062                | 1,121                | 0,059      | flack                  |
| 2013-11-28 08:00 - 2013-12-03 22:00 | 134        | 0,885                | 0,917                | 0,032      | flack                  |
| 2013-12-04 08:00 - 2013-12-05 13:00 | 29         | 0,796                | 1,385                | 0,589      | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-07 00:00 - 2013-12-10 07:00 | 79         | 0,988                | 1,028                | 0,04       | flack                  |
| 2013-12-11 23:00 - 2013-12-14 16:00 | 65         | 1,187                | 1,333                | 0,146      | flack                  |
| 2013-12-17 02:00 - 2013-12-19 02:00 | 48         | 0,775                | 1,321                | 0,546      | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-20 04:00 - 2013-12-21 10:00 | 30         | 0,822                | 1,207                | 0,385      | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-22 16:00 - 2013-12-24 05:00 | 37         | 0,715                | 0,75                 | 0,035      | flack                  |
| 2013-12-25 19:00 - 2013-12-27 04:00 | 33         | 0,815                | 1,21                 | 0,395      | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-31 21:00 - 2014-01-01 23:00 | 26         | 0,722                | 1,263                | 0,541      | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-05 03:00 - 2014-01-06 04:00 | 25         | 0,746                | 1,309                | 0,563      | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-10 12:00 - 2014-01-13 00:00 | 60         | 1,241                | 1,4                  | 0,159      | flack                  |
| 2014-01-13 01:00 - 2014-01-31 12:00 | 443        | 0,79                 | 0,856                | 0,066      | flack                  |
| 2014-02-03 09:00 - 2014-02-04 14:00 | 29         | 0,749                | 1,367                | 0,618      | stigande kontinuerligt |
| 2014-02-04 15:00 - 2014-02-07 12:00 | 69         | 0,752                | 0,917                | 0,165      | flack                  |
| 2014-02-12 06:00 - 2014-02-13 11:00 | 29         | 0,768                | 1,396                | 0,628      | stigande kontinuerligt |
| 2014-02-17 07:00 - 2014-02-20 15:00 | 80         | 0,979                | 1,367                | 0,388      | flack                  |
| 2014-02-23 02:00 - 2014-02-27 19:00 | 113        | 1,112                | 1,112                | 0          | flack                  |
| 2014-02-27 20:00 - 2014-03-02 20:00 | 72         | 0,75                 | 1,228                | 0,478      | stigande kontinuerligt |

**Tabell A 2** Ackumuleringstider och vattennivåer GB05 2012-2013

| <b>Intervall</b>                    | <b>tid</b> | <b>h<sub>0</sub></b> | <b>h<sub>1</sub></b> | <b>Δ h</b> | <b>karaktär</b>        |
|-------------------------------------|------------|----------------------|----------------------|------------|------------------------|
|                                     | [h]        | [m]                  | [m]                  | [m]        |                        |
| 2012-10-04 19:00 - 2012-10-10 00:00 | 149        | 0,407                | 0,407                | 0          | flack                  |
| 2012-10-10 00:00 - 2012-10-14 11:00 | 107        | 0,411                | 0,411                | 0          | flack                  |
| 2012-10-22 10:00 - 2012-10-29 16:00 | 174        | 1,106                | 1,106                | 0          | flack                  |
| 2012-10-30 22:00 - 2012-11-02 01:00 | 51         | 0,764                | 0,896                | 0,132      | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-02 20:00 - 2012-11-04 09:00 | 37         | 0,738                | 1,395                | 0,657      | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-04 10:00 - 2012-11-05 17:00 | 31         | 0,77                 | 1,322                | 0,552      | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-05 22:00 - 2012-11-10 06:00 | 104        | 1,251                | 1,251                | 0          | flack                  |
| 2012-11-11 16:00 - 2012-11-15 00:00 | 80         | 1,012                | 1,049                | 0,037      | flack                  |
| 2012-11-17 16:00 - 2012-11-22 15:00 | 119        | 0,951                | 0,99                 | 0,039      | flack                  |
| 2012-11-24 17:00 - 2012-11-27 09:00 | 64         | 0,926                | 0,926                | 0          | flack                  |
| 2012-11-29 08:00 - 2012-12-05 19:00 | 155        | 0,96                 | 1,187                | 0,227      | stigande kontinuerligt |
| 2012-12-05 20:00 - 2012-12-15 16:00 | 236        | 1,077                | 1,376                | 0,299      | stigande kontinuerligt |
| 2012-12-15 17:00 - 2012-12-24 08:00 | 183        | 0,747                | 1,395                | 0,648      | stigande kontinuerligt |
| 2012-12-24 09:00 - 2012-12-26 14:00 | 53         | 0,718                | 1,309                | 0,591      | stigande kontinuerligt |
| 2012-12-27 15:00 - 2012-12-29 22:00 | 55         | 0,739                | 0,739                | 0          | flack                  |
| 2013-01-01 10:00 - 2013-01-03 18:00 | 56         | 0,874                | 1,349                | 0,475      | stigande kontinuerligt |
| 2013-01-03 19:00 - 2013-01-08 12:00 | 114        | 0,782                | 1,396                | 0,614      | stigande kontinuerligt |
| 2013-01-08 13:00 - 2013-01-15 14:00 | 169        | 0,78                 | 1,395                | 0,615      | stigande, flack        |
| 2013-01-15 15:00 - 2013-01-28 16:00 | 313        | 0,72                 | 1,35                 | 0,63       | stigande kontinuerligt |
| 2013-01-31 15:00 - 2013-02-04 23:00 | 104        | 1,381                | 1,381                | 0          | flack                  |
| 2013-02-05 17:00 - 2013-02-07 06:00 | 37         | 0,76                 | 1,398                | 0,638      | stigande kontinuerligt |
| 2013-02-07 07:00 - 2013-02-11 15:00 | 104        | 0,856                | 1,398                | 0,542      | stigande kontinuerligt |
| 2013-02-11 16:00 - 2013-02-15 15:00 | 95         | 0,76                 | 1,22                 | 0,46       | stigande kontinuerligt |
| 2013-02-17 16:00 - 2013-02-20 13:00 | 69         | 0,84                 | 1,398                | 0,558      | stigande kontinuerligt |
| 2013-02-20 14:00 - 2013-03-01 13:00 | 215        | 0,746                | 1,383                | 0,637      | stigande kontinuerligt |

**Tabell A 3** Ackumuleringstider och vattennivåer GB09 2013-2014

| <b>Intervall</b>                    | <b>tid</b> | <b>h<sub>0</sub></b> | <b>h<sub>1</sub></b> | <b>Δh</b> | <b>Karaktär</b>        |
|-------------------------------------|------------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|
|                                     | [h]        | [m]                  | [m]                  | [m]       |                        |
| 2013-10-05 22:00 - 2013-10-09 01:00 | 75         | 0,433                | 0,997                | 0,564     | flack                  |
| 2013-10-09 03:00 - 2013-10-18 00:00 | 213        | 0,437                | 0,977                | 0,54      | flack                  |
| 2013-10-18 10:00 - 2013-10-26 06:00 | 188        | 0,432                | 1,034                | 0,602     | stigande kontinuerligt |
| 2013-10-26 09:00 - 2013-10-28 20:00 | 59         | 0,466                | 1,136                | 0,67      | flack                  |
| 2013-10-28 23:00 - 2013-11-03 04:00 | 125        | 0,592                | 0,983                | 0,391     | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-04 00:00 - 2013-11-05 09:00 | 33         | 0,445                | 1,087                | 0,642     | flack                  |
| 2013-11-05 12:00 - 2013-11-09 15:00 | 99         | 0,451                | 1                    | 0,549     | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-10 10:00 - 2013-11-15 18:00 | 128        | 0,438                | 0,982                | 0,544     | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-15 21:00 - 2013-11-21 11:00 | 134        | 0,49                 | 0,998                | 0,508     | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-21 13:00 - 2013-11-24 11:00 | 70         | 0,433                | 0,53                 | 0,097     | flack                  |
| 2013-11-24 13:00 - 2013-11-29 00:00 | 107        | 0,532                | 0,98                 | 0,448     | stigande kontinuerligt |
| 2013-11-29 02:00 - 2013-12-06 06:00 | 172        | 0,432                | 0,967                | 0,535     | flack                  |
| 2013-12-06 09:00 - 2013-12-14 19:00 | 226        | 0,446                | 0,961                | 0,515     | flack                  |
| 2013-12-14 22:00 - 2013-12-19 22:00 | 120        | 0,463                | 0,971                | 0,508     | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-20 00:00 - 2013-12-24 06:00 | 102        | 0,466                | 0,992                | 0,526     | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-24 09:00 - 2013-12-25 11:00 | 26         | 0,502                | 0,937                | 0,435     | stigande kontinuerligt |
| 2013-12-25 14:00 - 2013-12-27 07:00 | 41         | 0,503                | 0,966                | 0,463     | flack                  |
| 2013-12-28 01:00 - 2014-01-03 09:00 | 152        | 0,464                | 0,953                | 0,489     | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-03 11:00 - 2014-01-05 21:00 | 58         | 0,445                | 0,998                | 0,553     | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-06 00:00 - 2014-01-08 05:00 | 53         | 0,433                | 0,949                | 0,516     | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-08 08:00 - 2014-01-09 23:00 | 39         | 0,443                | 0,942                | 0,499     | flack                  |
| 2014-01-10 09:00 - 2014-01-31 04:00 | 499        | 0,464                | 0,728                | 0,264     | stigande kontinuerligt |
| 2014-01-31 22:00 - 2014-02-08 00:00 | 170        | 0,73                 | 2,276                | 1,546     | flack                  |
| 2014-02-08 17:00 - 2014-02-13 00:00 | 103        | 1,964                | 1,964                | 0         | flack                  |
| 2014-02-13 00:00 - 2014-02-15 15:00 | 63         | 0,428                | 0,943                | 0,515     | stigande kontinuerligt |
| 2014-02-15 17:00 - 2014-02-21 15:00 | 142        | 0,5                  | 0,715                | 0,215     | stigande kontinuerligt |
| 2014-02-22 00:00 - 2014-03-03 00:00 | 216        | 0,498                | 0,732                | 0,234     | stigande kontinuerligt |



**Tabell A 4** Ackumuleringstider och vattennivåer GB09 2012-2013

| <b>Intervall</b>                    | <b>Tid</b> | <b>h<sub>0</sub></b> | <b>h<sub>1</sub></b> | <b>Δh</b> | <b>Karaktär</b>        |
|-------------------------------------|------------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|
| Datum, intervall mellan pumpning    | [h]        | [m]                  | [m]                  | [m]       |                        |
| 2012-10-08 15:00 - 2012-10-15 18:00 | 171        | 0,433                | 0,497                | 0,064     | stigande kontinuerligt |
| 2012-10-16 05:00 - 2012-10-18 20:00 | 63         | 0,474                | 0,745                | 0,271     | stigande kontinuerligt |
| 2012-10-20 21:00 - 2012-10-29 17:00 | 212        | 0,438                | 0,738                | 0,3       | stigande kontinuerligt |
| 2012-10-30 13:00 - 2012-11-02 03:00 | 62         | 0,45                 | 0,724                | 0,274     | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-02 05:00 - 2012-11-11 07:00 | 218        | 0,473                | 0,914                | 0,441     | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-11 13:00 - 2012-11-15 03:00 | 86         | 0,57                 | 0,66                 | 0,09      | flack                  |
| 2012-11-15 15:00 - 2012-11-27 10:00 | 283        | 0,438                | 0,72                 | 0,282     | stigande kontinuerligt |
| 2012-11-28 19:00 - 2012-12-27 04:00 | 705        | 0,433                | 0,68                 | 0,247     | stigande kontinuerligt |
| 2012-12-27 07:00 - 2012-12-30 11:00 | 76         | 0,655                | 0,709                | 0,054     | flack                  |
| 2012-12-30 14:00 - 2012-12-31 21:00 | 31         | 0,466                | 0,99                 | 0,524     | stigande kontinuerligt |
| 2013-01-01 08:00 - 2013-01-24 08:00 | 552        | 0,658                | 0,74                 | 0,082     | stigande kontinuerligt |
| 2013-01-30 11:00 - 2013-02-27 08:00 | 669        | 0,786                | 0,996                | 0,21      | stigande kontinuerligt |

**Tabell A 5** Total använd avisningsvätska omräknat till propylenglykol 1 okt 2013 – 1 mar 2014**2013-2014**

| <b>Månad</b> | liter         | ton        |
|--------------|---------------|------------|
| Okt          | 4738          | 4,93       |
| November     | 30621         | 31,85      |
| December     | 72315         | 75,21      |
| Januari      | 288929        | 300,49     |
| Februari     | 64585         | 67,17      |
| <b>Summa</b> | <b>461188</b> | <b>478</b> |

**Tabell A 6** Total använd avisningsvätska omräknat till propylenglykol 1 okt 2013 – 1 mar 2014**2012-2013**

| <b>Månad</b> | liter          | ton            |
|--------------|----------------|----------------|
| Okt          | 24513          | 25,49          |
| November     | 100026         | 104,03         |
| December     | 458950         | 477,31         |
| Januari      | 312302         | 324,79         |
| Februari     | 284975         | 296,37         |
| <b>Summa</b> | <b>1180766</b> | <b>1228,00</b> |

## APPENDIX B



**Figur B. 1** 18 feb. Tydlig flock, GB05 5 °C



**Figur B. 2** 3 April. Klarare vatten, flockar har sedimenterat, samt tillväxt av organiskt material. GB05 5 °C



**Figur B. 3** Brandgult slam vid utlopp från ledningssystem till uppsamlingsdamm.



**Figur B. 4** Grönbrunt slam i utloppsrör till uppsamlingsdamm



**Figur B. 5** Tydliga bubblor vid ytan i GB09



**Figur B. 6** Grönbrunt slam på temperaturgivaren till logger

## APPENDIX C

**Tabell C 1** Analysresultat för stickprov i GB05, GB09 och GB11

| Brunn, datum | TOC               | propylenglykol | n-propanol |
|--------------|-------------------|----------------|------------|
|              | [mg/l]            | [mg/l]         | [mg/l]     |
| GB05 140213  | 500 ( $\pm 75$ )  | 400            | < 10       |
| GB05 140218  | 250 ( $\pm 38$ )  | 170            | < 10       |
| GB05 140226  | 170 ( $\pm 26$ )  | 94             | < 10       |
| GB09 140213  | 440 ( $\pm 66$ )  | 440            | 14         |
| GB09 140218  | 250 ( $\pm 38$ )  | 100            | < 10       |
| GB09 140226  | 80 ( $\pm 12$ )   | 36             | < 10       |
| GB11 140213  | 950 ( $\pm 140$ ) | 570            | 85         |
| GB11 140218  | 680 ( $\pm 100$ ) | 390            | 32         |
| GB11 140226  | 350 ( $\pm 53$ )  | 370            | 41         |

**Tabell C 2** Analysresultat för stickprov vid utlopp till till uppsamlingsdamm

| datum      | TOC    | propylenglykol | n-propanol |
|------------|--------|----------------|------------|
|            | [mg/l] | [mg/l]         | [mg/l]     |
| 2013-02-01 | 1000   | 8400           | 62         |
| 2013-02-12 | 4500   | 28000          | <100       |
| 2013-02-28 | 6900   | 20000          | 150        |
| 2013-03-12 | 2900   | 6800           | 140        |
| 2013-03-27 | 1400   | 1800           | <100       |
| 2013-04-09 | 1600   | 2800           | 100        |
| 2013-04-22 | 420    | 400            | <100       |
| 2013-05-07 | 150    | <100           | <100       |
| 2013-05-22 | 100    | 0              | 1          |
| 2013-06-05 | 350    | 0              | 0          |
| 2013-10-25 | 68     | 110            | 0          |
| 2013-11-21 | 130    | 214            | 0          |
| 2013-12-17 | 680    | 1200           | 18         |
| 2014-01-02 | 75     | 82             | 0          |
| 2014-01-17 | 99     | 100            | 3,6        |
| 2014-01-30 | 9400   | 12000          | 300        |
| 2014-02-13 | 1900   | 3900           | <100       |
| 2014-02-26 | 780    | 1200           | 46         |

**Tabell C 3** Analysresultat för nedbrytningsförsöket

| Prov märkning     | TOC<br>[mg/l] | propylenglykol<br>[mg/l] | n-propanol<br>[mg/l] |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| GB05 1 °C dag 1   | 930 (±140)    | 2000                     | < 100                |
| GB05 1 °C dag 3   | 770 (±120)    | 1300                     | < 100                |
| GB05 1 °C dag 6   | 760 (±110)    | 1400                     | < 100                |
| GB05 1 °C dag 14  | 730 (±110)    | 1200                     | < 100                |
| GB05 5 °C dag 1   | 800 (±120)    | Mätfel                   | < 100                |
| GB05 5 °C dag 3   | 690 (±100)    | 1200                     | < 100                |
| GB05 5 °C dag 6   | 690 (±100)    | 1400                     | < 100                |
| GB05 5 °C dag 14  | 710 (±110)    | 900                      | < 100                |
| GB05 14 °C dag 1  | 770 (±120)    | 1500                     | < 100                |
| GB05 14 °C dag 3  | 620 (±93)     | 1100                     | < 100                |
| GB05 14 °C dag 6  | 630 (±95)     | 940                      | < 100                |
| GB05 14 °C dag 14 | 580 (±87)     | 650                      | < 100                |
| GB09 1 °C dag 1   | 1500(±230)    | 8100                     | <100                 |
| GB09 1 °C dag 3   | 1400(±210)    | 1300                     | <100                 |
| GB09 1 °C dag 6   | 1400(±210)    | 2700                     | <100                 |
| GB09 1 °C dag 14  | 1300(±200)    | 2200                     | <100                 |
| GB09 5 °C dag 1   | 1400(±210)    | 4600                     | <100                 |
| GB09 5 °C dag 3   | 1300(±200)    | 1200                     | <100                 |
| GB09 5 °C dag 6   | 1300(±200)    | 2100                     | <100                 |
| GB09 5 °C dag 14  | 1300(±200)    | 2100                     | <100                 |
| GB09 14 °C dag 1  | 1500(±225)    | 1600                     | <100                 |
| GB09 14 °C dag 3  | 1200(±180)    | 1900                     | <100                 |
| GB09 14 °C dag 6  | 1200(±180)    | 1200                     | <100                 |
| GB09 14 °C dag 14 | 1200(±180)    | 2100                     | <100                 |