

Tjälskydd av tätkärna i fyllnadsdamm

Soil frost protection in tailings dam

Olle Edström
Jonas Jonsson

REFERAT

Tjälskydd av tätkärna i fyllnadsdamm

Olle Edström, Jonas Jonsson

På platser där temperaturen sjunker under fryspunkten under delar av året förekommer tjäle. Detta är något som påverkar byggnation i mark, och då även dammkonstruktioner. Damm I-J i Aitik utsätts för betydande tjälnedträngning på grund av det kalla klimat som råder.

Syftet med detta arbete har varit att konstruera några testsektioner med tjälskydd för I-J dammen. Sektionerna har dimensionerats baserat på resultat från simuleringar med COUP-modellen samt beräkningar av tjäldjup med Stefans formel. Sektionerna är designade utifrån kostnadseffektivitet vid fullskalebyggnation och är utrustade med instrumentering för att kunna utvärderas efter vintern 2007/2008.

En studie gjordes av vilka material som finns tillgängliga i området och vilka alternativa sätt det finns att skydda sig mot tjäle. Restmaterial från gruvdriften undersöktes då det finns god tillgång till dessa i dammens närhet och att de därför är billiga att använda. Vidare undersöktes möjligheten att isolera med isoleringsskivor samt att med snöfångare skapa ett isolerande snötäcke. För att testa de mest intressanta alternativen byggdes fyra sektioner med tjälskydd på dammen. De ska stå över vintern och under våren kontrolleras tjälnedträngningen så att resultatet kan utvärderas. Det ligger dock utanför detta examensarbete.

Simulerade tjäldjup har validerats mot både teoretiska beräkningar och uppmätta tjäldjup i området. Från detta dras slutsatsen att modellen har en god noggrannhet. Sannolikt kan resultatet vara en hjälp då tjälskydd ska dimensioneras på andra platser och dammar.

Sökord: fyllnadsdammar, tjäle, dammsäkerhet, COUP, georadar

ABSTRACT

Soil frost protection in tailings dam

Olle Edström, Jonas Jonsson

The phenomenon of ground freezing exists in areas where the temperature reaches negative degrees Celsius at parts of the year. This affects construction work in the ground, including dam constructions. Dam I-J in Aitik is exposed to heavy ground freezing due to the cold climate in the region.

The objective of this thesis has been to find an appropriate protection against frost, which can later be built at the time of the construction of a new erosion protection on the upstream slope of the dam.

A study was made of available materials in the close region to the dam, and the different ways there is to protect a dam from ground freezing. Waste materials from the mining were investigated because they exist in large quantities near at hand. Further, the possibility of using boards of Styrofoam and also using a fence to collect drifting snow was examined.

In order to dimension the sections properly, the COUP-model was used to simulate the parameters of the different materials and also the meteorologically conditions. The complex model requires a lot of input data, but the accuracy is very satisfying.

The frost penetration has also been calculated manually as a control to the model. Our aim is to find the most cost effective way to protect the dam from frost penetration. If the protection works satisfactory, the method can be used on other dams in areas with ground freezing.

Keywords: Tailings dams, ground freezing, dam safety, COUP, GPR

Royal Institute of Technology
Department of Land and water resources

Teknikringen 76
SE – 100 44 Stockholm
ISSN 1401-5765

FÖRORD

Denna uppsats utgör ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet. Arbetet utförs på uppdrag av Boliden AB genom Erik Kitok som konsulterat Sweco VBB AB i Stockholm. Annika Bjelkevik och Thomas Bohlin på Sweco VBB i Stockholm har handlett arbetet och Klas Hansson vid Institutionen för mark- och vattenteknik på KTH har varit ämnesgranskare. Allan Rodhe vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, har varit examinator.

Examensarbetet har utförts gemensamt men ansvaret för redovisningen har delats upp. Olle Edström har skrivit kapitel 2 (utom 2.3.5), avsnitt 3.2, 3.3.2, 3.5.3 och avsnitt 6.2-6.3. Jonas Jonsson har skrivit kapitel 1, avsnitt 2.3.5, kapitel 3 (utom 3.2, 3.3.2 och 3.5.3), kapitel 4, kapitel 5, avsnitt 6.1, kapitel 7 och har illustrerat.

Först och främst vill vi tacka Boliden AB (Erik Kitok) för chansen att utföra detta arbete genom företagets intresse att ligga i framkant när det gäller dammsäkerhet! Våra handledare Annika och Tomas ska ha ett stort tack för värdefullt stöd under arbetets gång! Vidare har ämnesgranskare Klas Hansson varit till stor hjälp och jättekul att arbeta med.

Övriga som vi riktar ett stort tack till är:

SWECO: Dag Ygland, Fredrik Jonasson, Mats Pönttillä, Linda Ormann och Nils Isaksson.

KTH: Annika Lundmark och David Gustavsson, Institutionen för Mark och vattenteknik.

Byggänget i Aitik: Thomas Utter med manskap.

Geocentrum Uppsala: Lars-Christer Lundin, Cecilia Johansson, Hans Bergström och Allan Rodhe, Institutionen för geovetenskaper.

Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU: Lave Persson och Gunilla Alvenäs, Institutionen för markvetenskap.

Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI: Kent Enkell och Håkan Arvidsson.

SMHI (Marcus Flarup) för kostnadsreducerad klimatdata.

Ett särskilt tack vill vi rikta till Per-Erik Jansson vid Institutionen för Mark och vattenteknik på KTH för ovärderlig hjälp med COUP-modellen, till Christer Gustavsson på Malå Geoscience för utförande av georadarundersökning samt till nära och kära!

Uppsala, oktober 2007, Olle Edström och Jonas Jonsson

Copyright © Olle Edström och Jonas Jonsson samt Institutionen för Mark och vattenteknik, KTH.

UPTEC W07 024, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala 2007.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING.....	1
1.1	SAMMANHANG.....	1
1.2	SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR.....	1
2	BAKGRUND.....	3
2.1	GRUVDRIFT I SVERIGE	3
2.1.1	Gruvprocessen i Aitik.....	3
2.1.2	Hantering av restmaterial.....	4
2.2	FYLLNADSDAMMAR	5
2.2.1	Kriterier för konstruktion.....	7
2.2.2	Instrumentering och mätning	7
2.2.3	Dammsäkerhet fyllnadsdammar.....	8
2.3	TJÄLNINGSPROCESSEN.....	10
2.3.1	Tjälnedträngning	10
2.3.2	Tjällyftning.....	13
2.3.3	Tjällossning	15
2.3.4	Konsekvenser av tjälning.....	15
2.3.5	Tjälskydd i damm	16
3	MATERIAL OCH METODER.....	19
3.1	ARBETSMETODIK	19
3.2	OMRÅDESBESKRIVNING I-J-DAMMEN	19
3.2.1	Beskrivning I-J-dammen	20
3.2.2	Lokala byggnadsmaterial.....	21
3.3	BESTÄMNING AV VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA	21
3.3.1	Värmeledningsförmågan	21
3.3.2	Genomförande	23
3.4	COUP-MODELLEN.....	25
3.4.1	Grundläggande inställningar	27
3.4.2	Specifika materialinställningar	27
3.4.3	Klimatinställning	29
3.4.4	Genomförande av COUP-modellering	30
3.5	NOGGRANNHET OCH TILLFÖRLITLIGHET	30
3.5.1	Begränsning av felkällor vid modellering.....	30
3.5.2	Referens-simulering med COUP-modellen	31
3.5.3	Analytisk beräkning av tjälldjup	31
4	RESULTAT	32
4.1	BESTÄMNING AV VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA	32
4.1.1	Undersökning av jordprover på köldlabb	32

4.1.2	Analytiskt beräkning av värmeledningsförmågor	34
4.2	<i>SIMULERING AV TJÄLDJUP</i>	35
4.3	<i>COUP-SIMULERINGAR AV SPECIELLT UTVALDA KONSTRUKTIONER</i>	38
4.4	<i>ANALYTISK BERÄKNING AV TJÄLDJUP</i>	40
5	DISKUSSION	41
5.1	<i>VALET AV ARBETSMETODIK</i>	41
5.2	<i>DE STUDERADE MATERIALENS EGENSKAPER</i>	41
5.2.1	A-sand.....	41
5.2.2	0-5 mm.....	42
5.2.3	Subb	42
5.2.4	0-50 mm	43
5.2.5	5-50 mm	43
5.2.6	Isoleringskivor.....	44
5.2.7	Snö.....	44
5.3	<i>NOGGRANNHET OCH FELKÄLLOR</i>	45
5.3.1	COUP-simuleringarnas noggrannhet.....	46
5.3.2	Felkällor	47
6	KONSTRUKTIONSUTFORMNING	51
6.1.1	Konstruktion 1	52
6.1.2	Konstruktion 2	52
6.1.3	Konstruktion 3: Isoleringskivor.....	53
6.1.4	Konstruktion 4: Snöfångare	54
6.2	<i>UPPFÖRANDET AV KONSTRUKTIONER OCH MÄTUTRUSTNING</i>	55
6.3	<i>UTVÄRDERING</i>	58
7	SAMMANFATTANDE KOMMENTARER	60
8	REFERENSER	61
8.1	<i>PUBLIKATIONER</i>	61
8.2	<i>INTERNET</i>	62
8.3	<i>INTERVJUER</i>	63
Bilaga 1	Siktkurvor A-sand 0-2 mm	64
Bilaga 2	Resultat från köldlab	71
Bilaga 3	Exempeluträkning av värmeledningsförmåga	77
Bilaga 4	Tätkärna och stödfyllning	79
Bilaga 5	Specifika materialinställningar, utförande	82

Bilaga 6	Meteorologiska data	85
Bilaga 7	Koefficienter Brooks-Coreys ekvation	87
Bilaga 8	Skalningsfaktorer för värmeledningsförmåga	88
Bilaga 9	COUP-Resultat jämförande studie.....	89
Bilaga 10	COUP-simuleringar av konstruktioner	107
Bilaga 11	Konstruktionsutformning	116
Bilaga 12	Kostnadsberäkningar.....	122
Bilaga 13	Borrinstruktioner för Gandahlmätare	127
Bilaga 14	Undersökning av tät kärnan med georadar.....	129

1 INLEDNING

1.1 SAMMANHANG

Vid Boliden AB:s gruvdrift i Aitik dämmer en 1800 meter lång dammvall upp vatten i ett klarningsmagasin. Dammen är enligt kraftbolagens riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS) klassad som en 1B damm vilket innebär att ett dammbrott kan resultera i allvarlig skada på viktiga samhällsanläggningar och betydande miljövärden. Det finns även en hög sannolikhet för stor ekonomisk skadegörelse och icke försumbar sannolikhet för förlust av människoliv.

Varje år tränger tjäle ned i dammvallen och dess tät kärna. Tjäle påverkar strukturen i mark genom upprepade cykler av frysning och tjällossning. Eftersom dammen innehåller en moränkärna med höga krav på packningsgrad och täthet tillåts inga förändringar över tiden. Tatkärnan i I-J-dammen ligger idag ytligt placerad, och är exponerad för tjälning längs med uppströms slänt och på krönet.

Till största delen skyddas dammkrönen på dammar idag genom att material i lämplig tjocklek läggs ut ovanpå krönet. Om dammen sedan ska höjas grävs detta skydd bort så att tatkärnan kan packas om och höjas. I viss utsträckning har dammkrön isolerats med andra material, till exempel isoleringsskivor. Det har visat sig vara en dyr och svår lösning. Isoleringsskivor kan även dölja sjunkhål på dammen vilket är en viktig indikator för att förutse dammbrott.

Denna undersökning har genomförts på uppdrag av Boliden AB, med handledning från SWECO VBB AB i Stockholm.

1.2 SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

Målet med detta arbete är att konstruera fyra testsektioner av tjälskydd för tatkärnan i I-J-dammen (fyllnadsdamm) i Aitik, Gällivare. Sektionerna ska designas utifrån kostnadseffektivitet vid fullskalebyggnation och vara utrustade med instrumentering för att kunna utvärderas efter vintern 2007/2008.

Lämpliga material och konstruktioner jämförs dels genom frysningsförsök i köldlaboratorium där frysningsförloppet kan studeras i detalj, dels genom simuleringar med COUP-modellen. Resultaten ska sedan valideras mot beräknade tjäldjup i dammen så att en bedömning kan göras om rimligheten och säkerheten.

Den uppmätta tjälnedträngningen i sektionerna ska sedan ligga till grund för dimensionering av det bästa tjälskyddet för I-J-dammen i fullskala. Av denna anledning måste hänsyn tas exempelvis till uppdragsgivarens framtida planer för dammen och dammsäkerhet.

Undersökningen avgränsas till att endast gälla I-J-dammen i Aitik. Ingen utredning har genomförts inom ramen för detta examensarbete kring de fyra föreslagna konstruktionernas miljöpåverkan vid fullskalebyggnation.

2 BAKGRUND

Detta kapitel börjar med en presentation av Bolidens verksamhet, som är gruvdrift. Sedan följer ett avsnitt om fyllnadsdammar som beskriver deras uppbyggnad, instrumentering och riktlinjer för säkerhet. Avslutningsvis följer ett centralt avsnitt om tjälningsprocessen.

2.1 GRUVDRIFT I SVERIGE

Gruvindustrin i Sverige är på stark framfarsch efter en längre svacka i mitten på 1900-talet. Uppsvinget beror till stor del på de ökade metallpriserna som följer i kölvattnet på den kraftiga industriella utveckling som råder på många håll i världen, till exempel i Kina. En annan orsak till ökad lönsamhet är utvecklingen mot effektivare brytnings- och anrikningsmetoder som gör det lönsamt att bryta berg med låg malmhalt. Hälften av malmen som bryts är järnmalm, resten är sulfidmalm (Isaksson och Lundström, 2005). Trakten kring Gällivare har båda sorter. I Malmberget bryts järnmalm av LKAB och i Aitik utvinns koppar ur sulfidmalm av Boliden.

2.1.1 Gruvprocessen i Aitik

Gruvan i Aitik togs i bruk 1968 då tekniken var så pass god att brytning var lönsam. Framtiden för Aitik ser ljus ut då stora malmreserver finns och Boliden satsar miljardbelopp på en expansion av verksamheten. Bland annat ska ett nytt anrikningsverk byggas med fördubblad produktionskapacitet. (www.boliden.se).

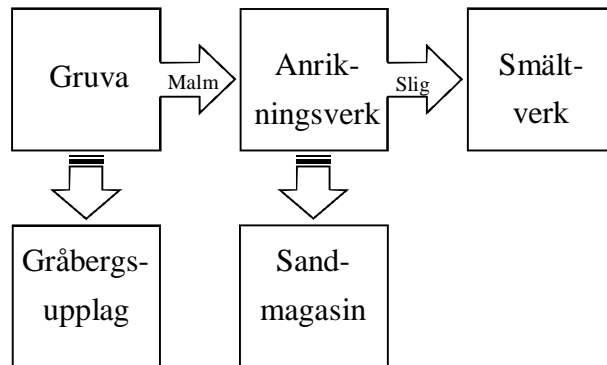
Aitikgruvan är ett dagbrott vilket innebär att malmen bryts under bar himmel. Motsatsen är underjordsbrytning som bland annat sker i närliggande Malmberget. Valet av metod styrs av malmkroppens metallhalt, hur djupt den ligger och dess geometri. Dagbrytning är oftast billigare men ger mer restprodukter i form av gråberg. (Isaksson och Lundström, 2005). Detta gråberg deponeras på tipp eller används som byggnadsmaterial, till exempel vid konstruktion av dammar. För att gråberget ska få användas till dammkonstruktion får det inte ha för mycket svavel i sig (se kapitel 2.1.2).



Figur 2.1 *Dagbrottet i Aitik*

Processen från berg till slutprodukten kopparslig sker i flera steg enligt figur 2.2. Första steget är att lösgöra berg genom borrning och sprängning. Det bortsprängda berget krossas, ofta i två steg. Från krossen transporteras malmen till anrikningsverket där den förädlas. Malmen mals till sand och vatten tillsätts så det bildas en slurry. Separation av malm från restprodukter sker

via selektiv flotation. Det innebär att luft och kemikalier, såsom samlarmedel och skumbildande medel tillsätts slurryn. Samlaren drar till sig koppar och skummedlet gör att små luftbubblor fäster sig på klustertyorna som då flyter upp till ytan. Mineralen avvattnas och slutprodukten slig transporteras till smältverk. (Aronsson m.fl., 2004)



Figur 2.2 Schematisk bild malmets väg från berg till koppar i Aitik

2.1.2 Hantering av restmaterial

En stor del av det material som bryts vid gruvdrift utgörs av berg med för låg mineralhalt.

Detta berg blir restprodukter i form av anrikningssand och gråberg.

Dessa produkter kan innehålla höga halter av bland annat svavel och måste då efterbehandlas. Gråberg som inte går att använda som byggnadsmaterial måste täckas över för att förhindra oxidering av sulfidmineralerna. (Isaksson och Lundström, 2005)

I anrikningssanden som kommer från anrikningsverket finns spår av metaller. Denna sand förvaras i Aitik i ett enormt sandmagasin som omgärdas av naturliga höjdparter samt dammar. I detta magasin sedimenterar sanden medan ytvattnet rinner ut via ett utskov till ett klarningsmagasin. Damm I-J dämmer in klarningsmagasinet. Ett problem som uppstår då sulfidmalm exponeras för syre är att en vittringsprocess startar. Vittring innebär att mineraler sönderdelas genom mekaniska och kemiska processer, till exempel oxidation. (Jonsson, 2003). Då materialet finfördelas ökar kontaktytan och oxidationen påskyndas. Det betyder att anrikningssanden utsätts för betydande vittring. Vid vittringen frigörs vätejoner som sänker pH-värdet och ytterligare påskyndar vittringen. Surt vatten har större potential att innehålla lösta metaller. Det kan innebära ett problem i gruvprocessen då vattnet som används i anrikningsverket har varit i kontakt med vittrande material, både anrikningssand och gråberg. De lösta metallerna i processvattnet, däribland koppar, drar åt sig en del av samlarmedlet vid flotationsprocessen. Det blir då brist på samlare och en del koppar försvinner ut till sandmagasinet. Effektiviteten i anrikningsprocessen har på grund av detta sjunkit från 89-90 % till 85-87 % vilket får anses vara en betydande minskning. I Aitik tillsätts kalk till slurryn som går ut i sandmagasinet. Man får då en bättre vattenkvalitet och prover från

klarningsmagasinet visar på relativt höga pH-värden samt låga metallhalter. Det vatten som innebär det största problemet är det som kommer från gråbergsdeponierna. Detta vatten sedimenterar genom vittrande gråberg och tas om hand och återanvänds med höga metallhalter. Förslag till lösningar på problemet är bland annat att tillsätta kalk även här alternativt att inte använda detta vatten utan pumpa ut det på sandmagasinet. (Sjöblom och Takala, 2007).

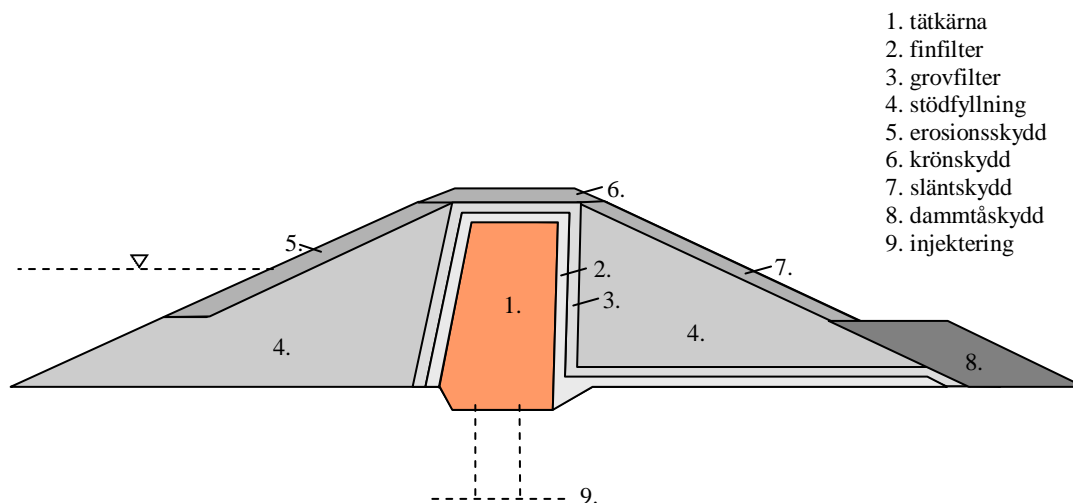
Det bästa sättet för efterbehandling av restmaterial för att förhindra oxidering är att se till att det inte kommer i kontakt med syre. Tyvärr är detta en omfattande och dyr process då det rör sig om mycket stora volymer. Idag finns det krav från myndigheterna att gruvföretagen ska ha en efterbehandlingsplan som ska göra det möjligt att återlämna gruvmark till samhället. Man pratar då om att dammar och tippor ska vara stabila på lång sikt, ofta nämns 1000 år. Idag finns inte kunskapen om hur detta ska uppfyllas, mer erfarenhet om efterbehandling av gruvdammsområden behövs för att marken säkert ska kunna överlämnas till samhället. (Fröberg m.fl., 2004)

2.2 Fyllnadsdamm

Den i Sverige vanligast förekommande typen av damm är fyllnadsdamm. Betongdamm är vanligare utomlands, men finns även i Sverige. En fyllnadsdamm består i huvudsak av packat naturligt material, såsom silt, morän och sand, men även av krossat berg samt sprängsten. Vilket material som används avgörs mycket av tillgång i närområdet.

Det finns olika typer av fyllnadsdamm. I-J dammen är en homogen morändamm med delvis rak och delvis lutande tatkärna. Med homogen menas att det är i princip samma material rakt igenom. Det som skiljer kärnan från stödfyllningen är dels krav på packningsgrad, dels att större stenar och block sorterats bort från kärnan.

En fyllnadsdamm består av olika beståndsdelar, se exempel i figur 2.3. Centrala delar beskrivs kortfattat nedan:



Figur 2.3 Genomsärning av en typisk konstruktion hos fyllnadsdammar. Vattenmagasinet ligger till vänster om dammen, och dess delar anges i figuren numrerade från 1 till 9.

- **Tätjärnan** – Har som uppgift att hindra vatten från att tränga igenom dammen. En viss genomströmning finns alltid, men den är begränsad. Materialet i kärnan har höga krav på sig vad gällande packning, plasticitet och deformationsegenskaper.
- **Filter** - En stor del av skadorna på fyllningsdammar beror på inre erosion som uppstår då läckvatten sipprar igenom dammen. För att hålla finmaterialet på plats krävs övergångszoner mellan olika material i form av filter. Som filtermaterial används sand, grus eller krossmaterial beroende på kornstorlekarna i omgivande lager.
- **Stödfyllning** – Det material som omger tätjärnan och håller dammen på plats kallas stödfyllning
- **Erosionsskydd** - Dammens uppströmsslänt är utsatt för vågor och is. Därför behövs ett erosionsskydd. Det bör vara grova block som står emot de yttre påfrestningarna
- **Krönskydd** – Dammar har ofta en körbana på krönet. Trafik är nödvändig för kontrollering av instrument och inspektion. Körbanan består av ett vägmaterial, oftast grövre krossmaterial, som dessutom fungerar som skydd för tätjärnan.
- **Släntskydd**- Släntskyddet är motsvarande erosionsskyddet fast på nedströms sluttning. Det är inte utsatt för vågor och behöver därför inte vara lika kraftigt som erosionsskyddet.
- **Dammtå** – Dammtån fungerar som en förstärkning till dammen. Det läckvatten som sipprar genom dammen rinner ut vid dammtån.
- **Injektering**- Om dammen inte är grundad mot fast berg behövs en injektering för att förhindra läckage under dammen.

2.2.1 Kriterier för konstruktion

Behovet av gemensamma riktlinjer för dammsäkerhet utmynnade 1997 i RIDAS, kraftföretagens egen rapport om hur standard för säkerhet mot dammbrott ska tillgodoses. Rapporten antogs av Svenska Kraftföreningen samma år.

RIDAS har tillämpningsvägledningar för konstruktion av fyllnadsdammar. Dessa råd bör lämpligen följas. De kan läsas i sin helhet i RIDAS kapitel 3.1.

Dammar ska dimensioneras så säkerhetskrav uppfylls mot alla typer av dammbrott. Den vanligaste orsaken till dammbrott är överströmning men vägledningarna för dimensionering innefattar även inre erosion. Inre erosion kan uppstå till följd av tjälskador.

Innan man bygger en fyllnadsdamm måste marken och berggrunden undersökas. Förhållanden som spelar stor roll förr konstruktionen är bland annat:

- Markens topografi – Kan naturliga höjdskillnader utnyttjas som dammvall?
- Jordlagerföljd – Finns det instabila skikt? Hur är dräneringen och kapillära stighöjden?
- Grundvattennivå – Kan den stiga upp i dammen?

Om dammen ej är grundlagd mot fast berg måste undergrunden ha liknande täthet som tåtkärnan. Om undergrunden inte uppfyller dessa krav måste åtgärder i form av tätning vidtas.

Byggnadsmaterials egenskaper, till exempel densitet och friktionsvinkel, bestäms oftast som ett medelvärde. Undantag är kornfördelning för filter och tätmorän där det krävs högre noggrannhet på kornfördelningar. Här används siktkurvor som visar kornstorleksfördelningarna på materialet.

2.2.2 Instrumentering och mätning

Målet med instrumentering är att hinna upptäcka eventuella brister och skador innan de utvecklas till en allvarligare incident. Behovet av instrument skiljer sig från damm till damm. Faktorer som spelar in är grundläggning, material och utformning av dammen.

Mätningar är som viktigast under byggandet av dammen samt under första dämningen, men även senare krävs kontinuerlig bevakning. Behovet av mätfrekvens beror på konsekvensklassen. Detta kan sammanfattas i tabell:

Tabell 2.1 Mätintervall inom parantes kan i vissa fall vara längre eller undvaras men bör eftersträvas (RIDAS, 2007)

Variabel för mätning	Konsekvens- klass 1A	Konsekvens- klass 1B	Konsekvens- klass 2
Läckage, (mätöverfall)	kontinuerligt	kontinuerligt	månadsvis
Sättning och sidorörelse av krön (mätbrunnar i dammkrön)	år	år	(år)
Portryck i tätkärna (portrycksgivare)	(år)	(år)	-
Vattenstånd i nedströms filter eller i stödfyllning	Halvår	(halvår)	-
Vattenstånd portryck i undergrund	halvår	halvår	halvår

För tjälningssprocessen är det viktigt att känna till värden för vattenstånd och portryck i dammen. I I-J dammen kommer det nu även att borras ned ett antal Gandhalmätare på testsektionerna för mätning av tjäldjup. Borrning i tätkärnan bör undvikas i möjligaste mån. Om det av någon anledning behövs borras i kärnan bör speciella metoder användas för att undvika skador på kärnan.

2.2.3 Dammsäkerhet fyllnadsdammar

Idag omfattas alla dammar i Sverige av RIDAS riktlinjer för dammsäkerhet vilket gör att en nationell standard kan hållas på en tillfredställande nivå. Det ska dock noteras att detta är just riktlinjer och inte lag. Det är upp till varje dammägare att följa dessa råd, och enligt miljöbalken är varje ägare ansvarig för sin damm samt att underhålla den.

Arbetet med dammsäkerhet pågår ständigt och RIDAS uppdateras kontinuerligt. Målen med dammsäkerhetsriktlinjerna är att (RIDAS, 2007):

- Definiera krav och ange riktlinjer för god och enhetlig dammsäkerhet
- Utgöra grund för enhetlig bedömning av dammsäkerhet och identifiera behov av dammsäkerhetshöjande åtgärder
- Kunna vara stöd för myndigheters dammsäkerhetstillsyn

Flödeskommittén utgav 1990 en rapport om konsekvens av dammbrott, men deras riktlinjer behandlade bara brott som uppstod på grund av högt flöde. RIDAS tar även upp skador och konsekvenser som uppkommit på annat sätt, till exempel tjälkskador.

En damm kategoriseras i en viss konsekvensklass beroende på hur stora skadorna blir vid ett brott. RIDAS inriktar sig på klasserna 1 och 2. För klass tre får ägaren själv dra upp riktlinjer.

Konsekvensklasserna ser ut enligt följande (RIDAS, 2007):

Klass 1A Hög sannolikhet för:

- mycket allvarlig skada på viktiga samhällsanläggningar
- mycket allvarlig skada på betydande miljövärde eller
- mycket stor ekonomisk skadegörelse

Klass 1B Beaktansvärd sannolikhet för:

- allvarlig skada på viktiga samhällsanläggningar
- allvarlig skada på betydande miljövärde eller

Hög sannolikhet för stor ekonomisk skadegörelse

Klass 2 Sannolikheten är icke försumbar för:

- beaktansvärd skada på samhällsanläggningar
- beaktansvärd skada på miljövärde eller
- ekonomisk skadegörelse

I-J dammen är enligt GruvRIDAS klassad som en klass 1B damm.

Riskenivån är beroende på hur omgivningen kring dammen ser ut, till exempel om infrastruktur och bostadsområden ligger nedanför dammen, men även på vattenmängden som frisläpps. Om känsliga områden befinner sig nedströms dammen men på ett betydande avstånd kan riskenivån sänkas, om säkra varningssystem kan installeras.

En faktor som ökar konsekvensen av brott är dominoeffekten, det vill säga om det finns andra dammar nedströms. I värsta fall spolats alla dammar nedströms bort. Här måste man beakta om magasinet för dammen nedströms klarar av att ta emot allt vatten som skulle komma om dammen ovanför havererade. Om så ej är fallet baseras konsekvensnivån på den sammanlagda effekten av dammbrott.

För varje anläggning skall det finnas en DTU-manual. Denna manual skall innehålla all fakta som behövs för att på ett säkert sätt utföra drift och underhåll av dammen.

RIDAS riktlinjer är ingen garanti mot incidenter, sannolikheten för haveri kan aldrig bli lika med noll. För att få perspektiv på säkerhetsnivån i Sverige kan nämnas att endast ett dödsfall har skett i Sverige till följd av dammbrott. Andra länder har haft betydligt större problem med olyckor.

2.3 TJÄLNINGSPROCESSEN

Alla jordmaterial med vattenhållande egenskaper utsätts till och från för tjälning, under förutsättning att de befinner sig i områden som någon gång under året har negativ köldmängd, det vill säga dygnsmedeltemperaturer som understiger 0° C.

När tjälen byggs på och senare tinas sker deformationer i jorden som kan ge skador på vägar, byggnader och dammar. Problemet kan delas upp i tre delproblem: (<http://www.swedgeo.se>)

- Tjälnedträngning och tjäldjup
- Tjällyftning och deformation
- Tjällossning och bärighetsreduktion

Dessa områden hör naturligtvis ihop, det blir ingen tjällossning utan tjälnedträngning etc. Men de är inte nödvändigtvis storleksberoende sinsemellan, en djup nedträngning behöver inte betyda en stor tjällyftning. Likaså behöver inte en stor lyftning innebära några problem med tjällossning.

2.3.1 Tjälnedträngning

Hur djupt tjälen tränger ned i marken beror på en rad faktorer.

Köldmängd i området är viktig, kall temperatur under lång tid gynnar tjälnedträngning. En motverkande faktor är markens energiinnehåll. På vinterhalvåret ökar markens temperatur med djupet, vilket innebär att ett värmefflöde sker mot markytan. Detta flöde bromsar nedträngning av tjäle. Olika stora energimängder lagras i marken beroende på nettostrålningen vid markytan. En faktor som har stor påverkan på strålningsbalansen är snötäcket. En snötäckt yta har mycket större albedo och reflekterar en stor del av inkommande strålning. Samtidigt isolerar snötäcket från energiutbyte mellan luft och mark. (Gärdenäs m. fl. 2003)

Markens termiska egenskaper värmekapacitet och värmeledningsförmåga har en avgörande inverkan på tjälnedträngningen. Med en jords värmekapacitet menas den energi som går åt till att ändra temperaturen hos en viss mängd av jorden. En hög värmekapacitet leder till ett trögare system. (Hansson, 2005)

Energi kan transporteras på tre sätt; strålning, konvektion och ledning. *Strålningen* kommer från de elektromagnetiska vågor som utsänds från alla material varmare än 0° K.

Konvektion innebär förflyttning av värmeförande massa, till exempel regninfiltration i mark.

Ledning är när energi förflyttas i en kropp genom molekylära rörelser. En molekyl rör sig fortare ju varmare den är. Vid temperaturskillnad i en kropp överförs energi från de snabbare varma molekylerna till de långsammare kalla. (Hansson, 2005)

De största faktorerna för jordens värmeledningsförmåga är packningsgrad och vattenhalt. Packad jord leder värme bättre på grund av att kontakten mellan partiklar ökar. I en opackad jord ökar värmeledningen med ökad vattenhalt då värmen får möjlighet att ledas genom vatten istället för luft. Om jorden är packad kan ökad vattenhalt ge sämre ledningsförmåga då en vattenlins tränger sig in mellan den tidigare kontakten mellan partikelytor.

En annan orsak är skillnaderna i värmeledningsförmåga hos jordprofilens komponenter (tab 2.1). Skillnaderna är vanligtvis minst hos lerjordar eftersom de dels inte innehåller mycket mineral, dels sällan torkar ut mycket. Den låga mineralhalten gör att värmeledningen inte blir extremt stor och eftersom värmen kan vandra lättare genom vatten än luft mellan jordpartiklarna har leror oftast inte heller väldigt låg värmeledningsförmåga. (Gärdenäs m. fl. 2003)

Tabell 2.1 Olika ämnens termiska konduktivitet samt värmekapacitet (Williams m.fl., 1989)

Ämne	Värmeledningsförmåga, ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Värmekapacitet, ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Kvarts	8,80	800
Lera	2,92	900
Organiskt Material	0,25	1920
Vatten	0,56	4180
Is	2,24	2100
Luft	0,025	1010

En annan faktor att ta hänsyn till är jordens struktur. En grovkornig jord kan inte hålla lika mycket vatten som en finkornig jord. Det beror dels på att kapillärförmågan är sämre hos den grovkorniga men även att partiklarnas kontaktyta mot luft inne i jordens porer är mindre. Då finns det mindre potentiell yta för adsorptivt bundet vatten.

Det går åt stora mängder energi vid fasövergången från flytande vatten till is. Om jorden innehåller lite vatten går det inte åt så mycket energi till frysning och tjälen tränger här ned till större djup. I en finkornig jord med mer vatten går det åt mycket energi till att frysa vattnet i marken och nedträngningen bromsas upp. Det talar för finkorniga material när det gäller isolerande förmåga. (<http://www.swedgeo.se>)

Material med isolerande effekt, till exempel organiskt material, begränsar tjälnedträngning. Organiskt material är bra på att binda vatten och enligt tidigare resonemang hämmar detta tjälnedträngningen. De organiska beståndsdelarna i marken är även dåliga ledare av värme och ökar den isolerande förmågan.

Yttre omständigheter spelar en stor roll för hur djupt tjälen går i marken. Viktigast här är ett isolerande snötäcke, men även vind och molnighet spelar in. För att minimera nedträngning är det viktigt att marken täcks av snö innan den verkliga kylan slår till.

Nedträngningen av tjäle går fortast i början av vintern då tjälfronten är nära luften. Maximalt djup brukar uppnås i februari-mars. Även upptiningen går fortast i början och sker till största delen uppifrån, men även till viss del underifrån. (<http://www.swedgeo.se>)

2.3.2 Tjällyftning

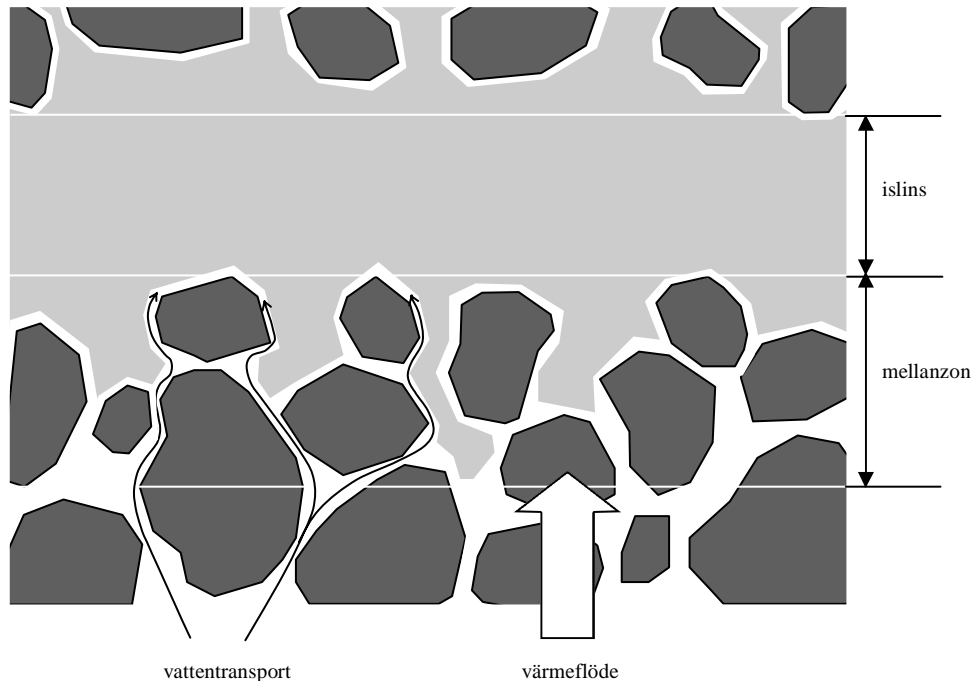
När tjälen byggs på kallas det tjällyftning. Den orsakas av två processer, dels frysning av porvatten i jorden och dels bildning av islinsor. Den förra ger inte upphov till så stora deformationer då den endast orsakas av vattnets cirka 10-procentiga volymökning vid omvandling till is. Den senare däremot kan ge mycket stora skador i form av tjällyftning. (Knutsson 1981)

Islinsorna orienterar sig allmänt parallellt med isotermer, alltså i horisontellt läge. Det gör att hävningen främst sker i värmeflödets riktning, vertikalt mot markplanet.

Islinsornas storlek beror bland annat på kapillaritet och permeabilitet, men även avstånd till grundvattenyta och temperaturgradient. För att en islins ska kunna växa till behöver den tillgång på vatten. Om grundvattnen ligger högt har vattnet kortare väg att vandra och bildning av is underlättas. (Miller, 1980)

Tillgången på vatten beror på kapillaritet och permeabilitet. Med kapillaritet menas markens förmåga att "suga upp" vatten. Permeabilitet är ett mått på markens genomsläpplighet. Kapillariteten är störst i finkorniga jordarter. Grövre jordarter såsom sand och grus räknas därför inte som tjälfarliga. För riktigt finkorniga jordar, såsom lera, är visserligen kapillariteten hög men permeabiliteten är låg. Vattnet hinner då inte fram till frysfronten under frysperioden och tjälningen begränsas. De mest tjälfarliga jordarna är de som har relativt höga värden på både kapillaritet och permeabilitet. Dessa egenskaper återfinns hos silthaltiga jordar och de har också den högsta tjälfarlighetsklassen, klass tre. (<http://www.swedgeo.se>)

Vattentransporten beror även på markens fysiska och kemiska egenskaper. Alla dessa är inte till fullo utredda. Något som man dock känner till är att vattnet närmast partiklarna är hårt bundet via adsorption. Detta vatten fryser senare än vatten i mitten av porerna. Det betyder att det finns en viss mängd fritt vatten även i frusen jord. Detta ofrusna vatten har ett lågt tryck. Ju mindre ofrusat vatten vi har desto lägre blir trycket. Det skapas då ett sug mot dessa områden och vatten tränger in i den frusna jorden. I de flesta fall sträcker sig en kontinuerlig vattenlinje av det adsorptivt bundna vattnet långt in i den frusna jorden och vattnet kan vandra mot områden med lägre tryck. Finkornigare jordar har större kontaktyta och därmed en tjockare vattenlinje som dessutom sträcker sig längre in i det frusna materialet och underlättar därmed vattentransport. Begränsningen för finkorniga jordar blir istället permeabiliteten. Permeabiliteten i frusen jord är temperaturberoende och ökar med högre temperatur. Detta beror på att vid högre temperatur finns det mer ofrusat vatten där transport kan ske. (Knutsson 1981)



Figur 2.6 Bildning av islins. När ett kallt klimat leder till att värme transporteras upp ur marken och vatten fryser till is uppstår en negativ energipotential. Denna resulterar i att vatten sugas mot en tillväxande islins. Närmast markpartiklar motverkar kapillära krafter frysnings vilket leder till att vatten kan transporteras via dessa ofrusna kanaler, genom annars frysta jordlager (mellanzon). I och med att vatten når islinsen kan denna växa till ytterligare vilket leder till att marken reser sig och islinsen blir mäktigare.

Lägre temperatur ger en lägre energinivå och därmed ett större sug av rörligt vatten. Samtidigt har vi en lägre permeabilitet vid lägre temperatur. Islinsen bildas där dessa faktorer kompromissar på bästa sätt. Det visar sig vara en liten bit in i den frusna zonen där temperaturen ligger strax under noll. En annan faktor som spelar in är effektivtrycket i jorden. Om trycket är högt krävs det en lägre temperatur för att starta isbildning. Zonen mellan nollisotermen och isbildningen blir större än vid opackad jord. I en packad moränkärna är trycket relativt stort, så denna zon kan ha en betydande utsträckning. Marken blir inte opåverkad här bara för att isbildning inte sker, utan jorden spricker upp. Sprickningen mönstrar sig ofta som vertikala polygon.

Ett vanligt fenomen uppstår då en islins har dragit åt sig vattnet närmast under. Det finns då inte mer vatten att frysa och det som händer är att det blir en ny islins ett stycke ned där vattentillgången är bättre. Detta kallas ”rytmisk isbandning”.

Storleken på tjällyftningen avgör hur stora skadorna blir på mark och infrastruktur. Tyvärr är det svårt att avgöra hur stor islins som bildas. Viktiga faktorer är markens effektivtryck, negativa temperaturen, jordens struktur och lagerföljd samt vattentillgång. Tjockleken hos

varje lins kan variera från några millimeter upp till flera decimeter. De tjockaste islinserna bildas i regel i gränsskiktet mellan olika material. Tjällyftningen är den sammanlagda verkan av alla islinser. Ett långsamt frysförlopp resulterar ofta i en större isbildning. Marken hinner då transportera upp vatten till frysområdet.

2.3.3 Tjällossning

Tjällossning sker på våren då jorden tinar och det frusna vattnet frigörs. Till största del sker detta från markytan och nedåt även om viss tining sker underifrån. Jorden gör sig av med det överskott av vatten som tjälningen innebar. Om upptiningen sker snabbt och dräneringen är dålig så hinner marken inte göra sig av med överskottet av vatten. Detta överskott är ofta mer än vad porsystemet rymmer och då ökar portrycket och därmed minskar effektivtrycket enligt effektivspänningsekvationen:

$$\text{Effektivtryck} = \text{Totaltryck} - \text{Portryck} \quad (1)$$

Ett minskat effektivtryck innebär att marken får sämre hållfasthet och bärighet på grund av att bindningar i marken försvagas. Ett problem uppstår då jordens övre lager tinar medan det är fruset längre ned. Tjäljen i marken hindrar då vattnet från att dräneras och bärigheten i de övre lagren blir minimal.

Avgörande för om problem ska uppstå är till stor del vädret under våren, och inte lika mycket hur stor tjällyftningen var under vintern. De mest gynnsamma förhållanden för tining är om det under dagen är några plusgrader och under natten någon minusgrad. Då hinner det frigjorda vattnet dräneras bort. Värsta tänkbara scenario är om en vinter med mycket tjällossning övergår i en varm och regnig vår. En sak som förvärrar skadorna vid tjällossning är om marken utsätts för dynamisk belastning under markens upptinande. På små vägar med sämre skydd för tjäleffekter kan stora skador uppstå om vägen trafikeras under tjällossningen. Det som händer är att porvattnet pressas ihop och portrycket stiger. Då sjunker effektivtrycket och därmed bärigheten enligt tidigare resonemang. (Knutsson 1981)

2.3.4 Konsekvenser av tjälning

Trots att morän är en vanlig jordart, inte minst inom byggsektorn, har det inte forskats så mycket på hur jordens karaktäristik påverkas av upprepad tjälning och tining. En viktig egenskap som man dock noterat är att packningen naturligt förbättras efter några få cykler av tjälning och tining. Det har att göra med volymförändringar som uppstår då vatten expanderar. Detta gäller främst för opackad morän. I fallet med tät kärnan i I-J dammen är den redan packad och en tjälning-tining cykel borde där ha motsatt effekt. En tinande jord tappar oftast mycket i hållfasthet, inte bara mot det frusna stadiet utan även mot normalstadiet enligt teorin om effektivspänning och portryck tidigare.

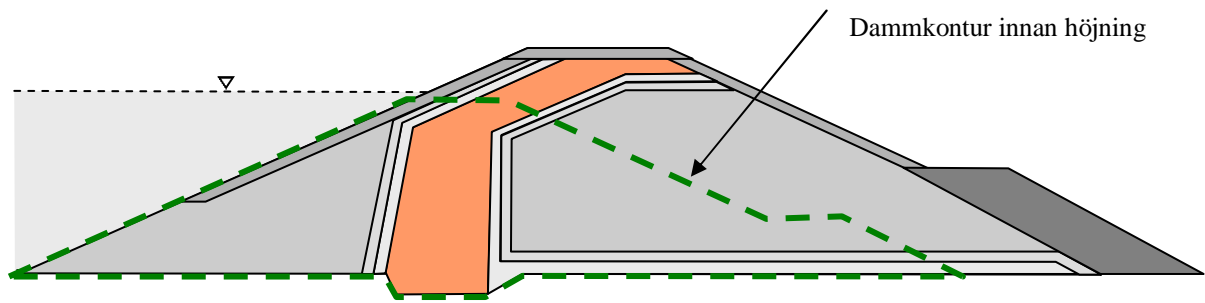
För konstruktioner såsom dammar och vägbankar kan tjälskador ställa till stora problem. Potthål och uppluckring av material med reducerad hållfasthet är typiska skador från tjälning och tining. En uppluckring av tätkärnan och filter kan leda till större genomsläpplighet samt inre erosion och i det långa loppet dammbrott om inga åtgärder vidtas. Ett annat fenomen som noterats är så kallad stenupplyftning. Islinsen som bildas under stenar i moränen trycker upp stenen mot markytan. Om denna vandring sker genom till exempel ett filter kan skador uppstå.

2.3.5 Tjältskydd i damm

De skyddsåtgärder som tillämpas på vägar och byggnadsgrunder för att motverka tjälning är ibland otillräckliga för skydd av jorddammar. Generellt sett är risken för tjälskador i dammar större ju mindre dammen är beroende på större temperaturvariationer. Låga dammar har mindre värmekapacitet än höga och känsliga delar som tätkärna och filter ligger mer utsatt. (Vattenfall 1988)

Tjäl djupet påverkas av luftens temperaturförhållanden, dammens konstruktion och magasinets vattenståndsvariation. Dygnet och årets temperaturvariationer dämpas nere i marken, och vid det så kallade nedträngningsdjupet kan temperaturskillnaderna mellan olika tider på året helt försummas. Den värmelagring som sker under varma årstider magasineras under markytan och förbrukas vid kyligare klimat. Under kalla årstider bidrar det långsamt genomströmmande vattnets värmeförråd till att fördröja köldinträngning i berörda delar av dammen. (Vattenfall 1988)

Tätkärnan i svenska jorddammar utgörs vanligtvis av väl packade sandiga eller siltiga moräner. Mellan tätkärnan och stödfyllning ligger filterzoner med dränerande förmåga som hindrar materialtransport. Eftersom moränen i tätkärnan kan vara tjälfarlig måste denna skyddas mot tjäle. Dammkrönet på den klassiska dammkonstruktionen (figur 2.7) där tätkärnan ligger mest ytligt, långt från uppvärmande vattengenomströmning från magasinet och med stor köldexponering ovanifrån, är vanligtvis mest utsatt för tjälskador. (Vattenfall 1988) Vid höjning av dammar används ofta en teknik med snedställd tätkärna längs med uppströms slänt (figur 2.7). I dessa fall ligger tätkärnan avsevärt mer exponerad för köldinträngning genom erosionsskyddet på slänten (jämför innan höjning i figur 2.3).



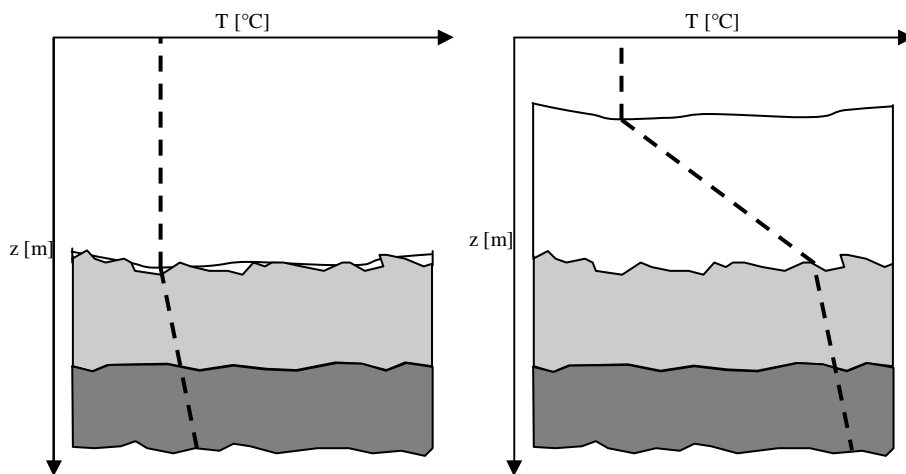
Figur 2.7 IJ-dammen har en lutande tätkärna längs med uppströmsslätten. Dess ytliga läge ger stor köldexponering vilket leder till tjälning. Den streckade linjen motsvarar dammens ytterkontur innan höjning.

Eftersom stödfyllningarna och filtren i regel skyddar tätkärnan mot frost behöver man inte isolera dessa delar av dammen speciellt. Ur frostsynpunkt rekommenderas grus som stödfyllningsmaterial före sten eftersom frostdjupen i stenfyllningar kan bli mycket stora. (Vattenfall 1988) Vid skydd av dammkrönet måste moränen i tätkärnan skyddas så att inte tjäle tränger ner under den högsta tillåtna vattennivån. (RIDAS, 2007) Till största delen skyddas dammkrönen idag genom att material i lämplig tjocklek har lagts ut ovanpå krönet. Om dammen sedan ska höjas grävs detta skydd bort så att tätkärnan kan packas om och höjas. I viss utsträckning har dammkrön isolerats med isoleringsskivor vilket har visat sig vara en dyr och svår lösning. Även isoleringsmaterialet Glassten har testats vilket är lättare att hantera exempelvis i uppströmsslätten. (intervju Peter Viklander, Vattenfall)

Vid anläggningen av dammen ska allt tjälfarligt material schaktas bort innan byggnationen av dammen påbörjas så att inget tjälfarligt material ("mineraljord med mer än 15 viktprocent av materialet som är mindre än 60 mm passerar 0,06 mm sikt, om dessutom dess kapillaritet är minst 1,5") byggs in i dammen i onödan. Under uppförandet av, och vid ingrepp i, dammkonstruktionen är det viktigt att begränsa köldinträngning. Om arbetet att anlägga en damm måste avbrytas inför vinter för att sedan återupptas nästkommande år ska tätjorden skyddas. Detta utförs både för att minska tjälskjutning och för att arbetet ska kunna återupptas så tidigt som möjligt efter vintern. Normalt schaktar man då över dammen med lös jord eller isolerar med isoleringsskivor. När fyllningsarbetet återupptas tas skyddet bort och tätjorden återpackas ned till det djup tjälen trängt ned under vintern. (Vattenfall 1988)

Under normala förhållanden pågår en ständig vattengenomströmning genom dammens bottenlager. Tjälskador i nedströmsslätans bottenparti kan leda till hållfasthetsproblem och utgör därför en risk. Då genomströmningen av vatten minskar i detta område ökar också möjligheten för köldnedträngning. Om horisontalfiltret fryser kan filtrets avbördningsförmåga minskas och därigenom leda till inre erosion i omgivande jordlager. Genom att schakta upp material längs med slänkfoten isoleras området och horisontalfiltret mot tjäle. (Vattenfall 1988)

Oss veterligen finns inga konstruktioner på dammar som har för avsikt att fånga och lagra snö. Detta skulle dock, liksom i naturen, fungera som ett naturligt skydd mot tjäle. Markens värmekonduktivitet är mer än 10 ggr så stor som för nyfallen snö, och det räcker att ett snötäcke med ett par decimeters tjocklek ligger på marken för att det mesta av temperaturfallet från luft till tjälfront ska ske i snön (Eckersten, m.fl., 2003). Snö fungerar som ett isolerande skikt som kapslar in jordens värmestrålning. Detta väger upp minskningen av kortvågig instrålning till följd av snöns reflektion. Figur 2.8 visar hur temperaturgradienten (streckad linje) kan skilja sig åt i två markprofiler, med och utan snö.



Figur 2.8 Temperaturgradienten i två markprofiler visar snöns isolerande funktion. Den dåliga värmeledningen i snön håller markvärme från att slippa ut i luften, samtidigt som snön håller den kallare lufttemperaturen från att penetrera ner till markytan

3 MATERIAL OCH METODER

3.1 ARBETSMETODIK

Uppgiften var att utforma ett test som bestämmer ett kostnadseffektivt tjälskydd för tåtkärnan i I-J-dammen i Aitik. Resultatet ska ligga till grund för att skydda tåtkärnan i hela IJ-dammen mot frysning.

Med COUP-modellen simulerades hur olika kombinationer av restmaterial från Bolidens gruvdrift fungerar som skydd mot tjälning i tåtkärnan. För att trimma in modellen genomfördes många olika inställningar för att anpassa simuleringarna till att beskriva dammens konstruktion och funktion så noggrant som möjligt. Vidare gjordes många specifika inställningar för att beskriva de olika simulerade materialen, där bland annat funktionen för värmeledningsförmågan justerades för att stämma mot varje enskilt material.

Värmeledningsförmågan beräknades utifrån laborationer på materialen som genomfördes på köldlaboratorium på Geocentrum i Uppsala.

Med stöd av COUP-modellen rangordnades Aitik-materialens effektivitet som tjälskydd. Detta vägdes samman med observationer från köldlabbet, information om kostnader associerade till byggnation med respektive material och uppskattningar av dess egenskaper att användas i en konstruktion (bärlighet, dammsäkerhet, etc.). Utifrån detta konstruerades fyra tjälskyddande konstruktioner med instrumentering för att mäta tjälnedträngningen under vintern 2007/2008.

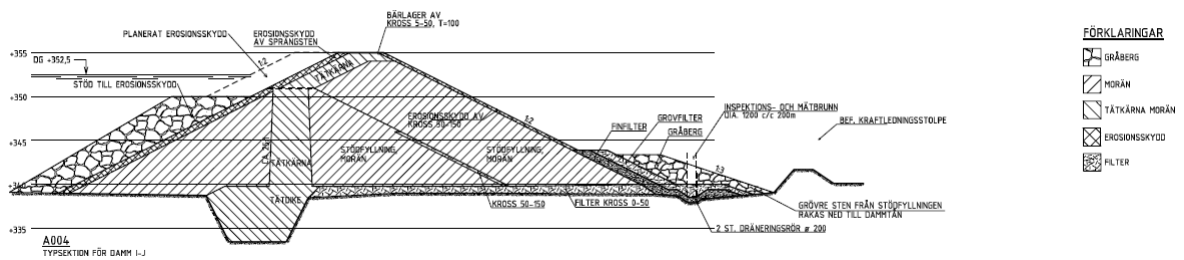
För att undersöka omfattningen av tjälskador i dammens tåtkärna undersöktes denna med georadar. Malå Geoscience utförde undersökningen.

3.2 OMRÅDESBESKRIVNING I-J-DAMMEN

I-J dammen är belägen vid Aitikgruvan cirka en mil sydost om Gällivare. Den nordliga bredgraden (67° nordlig bredd) ger ett kyligt klimat med långa vintrar och stor tjälnedträngning i mark. Den för tjälnedträngningen viktiga negativa köldmängden ligger i Aitik på ca 65 000 negativa timgrader. Exempel: Om det är 10 grader kallt i 5 timmar blir köldmängden $10 \times 5 = 50$ negativa timgrader. Den första dagen med snötäcke infaller i regel i mitten av oktober och snön ligger till mitten av maj (www.smhi.se). Maximalt blir snötäcket en dryg meter djupt på opåverkad mark och utgör ett isolerande täcke mot kyla. Detta gäller tyvärr inte på I-J dammen då dess exponering mot vind gör att snön blåser bort. Den dominerande vindriktningen för området är nordvästlig under vintertid vilket betyder att vinden kommer snett in mot dammvallen från nedströms slänt (fig. 3.2). Med snöfångare hoppas vi kunna binda ett snötäcke på dammvallen som får fungera som isolator.

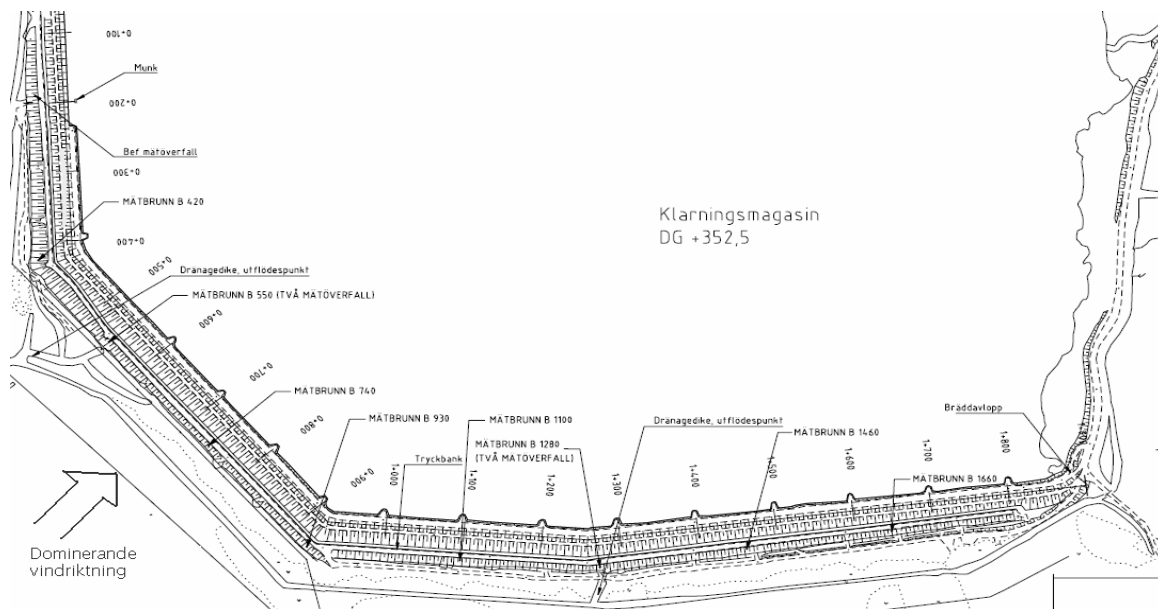
3.2.1 Beskrivning I-J-dammen

I-J dammen är en homogen fyllnadsdamm. Den byggdes från början med en rak tåtkärna av packad morän, men vid en senare höjning av dammen använde man sig av metoden med lutande tåtkärna. Stödfyllningen är av morän taget från närområdet kring Aitikgruvan. Ingående material samt dimensioner framgår enligt (figur 3.1). Det är i samband med det planerade utbygget av erosionsskydd som man nu även vill skydda dammen från tjälnedträngning. I-J-dammen har ett tätdike för anslutning mot tätmorän. Detta är för att hindra läckage under dammen.



Figur 3.1 Tvärsnitt I-J-dammen

Dammvallen är 1800 meter lång och beskriver en halvmåne (figur 3.2). Delen där testsektionerna är byggda ligger vid sektion 0+300, vilket ses på figur 3.2. Sektionerna samt dominerande vindriktning är markerade i bilden.



Figur 3.2 I-J dammen sedd ovanifrån. Avståndsskala i meter sett från vänster med den dominerande vindriktningen markerad

3.2.2 Lokala byggnadsmaterial

Jordmånen runt Aitikgruvan består till stor del av morän varför tillgången på lämpligt material till tätkärna är god. Andra byggnadsmaterial framställs i krossen förutom anrikningssand (A-sand) som är en restprodukt från anrikningsverket samt sprängsten i form av gråberg som kommer från brottet. Sedan 1999 finns gråberget i två miljöklasser, vanligt gråberg samt miljögråberg. Miljögråberget har högre krav på låga halter av svavel och koppar samt neutraliserande och syrabildande kvoten, N-PAP kvoten. (Iris Takala) Allt material som krossas kommer från miljögråberg så krossmaterial fungerar bra att använda i dammarna. Krossen kan framställa material i fraktioner från 2-6 mm upp till 50-150 mm. Vi har vid byggandet använt fraktionerna 5-50 mm, 0-40 mm samt 0-50 mm. För siktkurvor för krossmaterial samt A-sand (se bilaga 1).

3.3 BESTÄMNING AV VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA

Värmeledningsförmågan hos olika material är generellt sett väldigt dåligt kartlagda trots att detta spelar en stor faktor vid tjälfrysning. Genom att studera temperaturförändringen på olika djup i ett jordprov som utsattes för frysning kunde värmeledningsförmågan beräknas för olika intressanta material från Aitik-området. Utöver detta gav frysförsök även ytterligare information om materialens tjälningsegenskaper.

3.3.1 Värmeledningsförmågan

Instantaneous Profile Method går ut på att uppskatta värmeledningsförmågan utifrån mätningar och beräkningar av energiförändringen i markprofilen. Detta utförs med temperaturgivare som registrerar hur temperaturen förändras på olika djup i ett prov som utsätts för en temperaturförändring.

Värmeledningsförmågan kan beräknas utifrån följande tre samband:

$$G = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

$$G = \frac{\Delta E}{\Delta T} \quad (3)$$

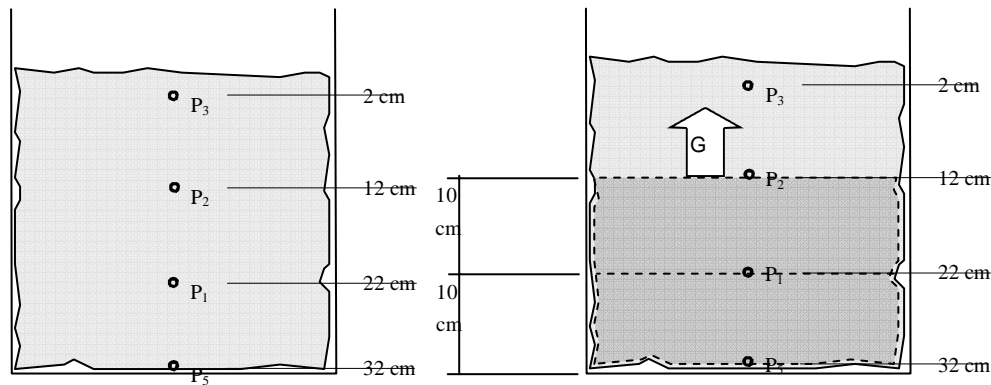
$$\Delta E = C \sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta z_i \quad (4)$$

Den nedersta ekvationen beräknar energilagringen i en profil med n skikt. I övrigt är G = värmeflöde, λ = värmeledningsförmåga [$\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$], dT/dz = temperaturgradienten, $\Delta E/\Delta t$ = energiförändringen mot tiden, C = provets värmekapacitet [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$], ΔT = temperaturförändringen mellan två djup, Δz = avståndet mellan de två studerade temperaturgivarna, Δt = tidsförändringen (vilket beräknas som tidsskillnaden mellan de två studerade tidpunkterna). Sammantaget ger detta:

$$\lambda = -\frac{G}{dT/dz} = -\frac{\Delta E/\Delta T}{dT/dz} = -\frac{C \sum (\Delta T \Delta z)}{dT/dz} \quad (5-7)$$

Värmekapaciteten, C, beräknas enligt: $C = X_m * C_m + X_o * C_o + X_w * C_w + X_i * C_i + X_a * C_a$. Indexen betecknar mineral (m), organiskt material (o), vatten (w), is (i) och luft (a), X = volymsandel.

Den genomsnittliga temperaturgradienten under en viss tidsrymd ges då temperaturen (T) ritas upp mot djupet (z) och tangenter dras från kurvan vid det djup som motsvarar den studerade ”boxens” överkant. Temperaturgradienten beräknas som medelvärdet av två utvalda temperaturkurvor för ett visst tidsintervall och vid ett visst djup i provcylindern. Figur 3.1 visar hur instrumentering i form av temperaturgivare kan placeras i en markprofil för att beräkna värmeflödet ur en utvald sektion (här markerad mörkare).



Figur 3.3 Genomsnitt av den provcylinder som användes på kölldlaboratorium för att undersöka material från Aitik. Prickarna i mitten av figurerna visar temperaturgivarnas positioner i förhållande till markytan. Den högra figuren visar värmeflödet (G) vid djupet 12 cm, vilket beräknades utifrån temperaturförändringen på olika djup i jordproverna.

COUP-modellen uppskattar automatiskt värmeledningsförmågan hos ett material baserat på kornstorleksfördelning eller pF-kurva (materialets vattenhållande egenskap). Eftersom värmeledningsförmågan förändras hos ett material när det är fruset representeras parametern i COUP-modellen av två funktioner, där den ena bestämmer värmeledningsförmågan för icke-frusen jord och den andra för frusen jord. Funktionerna bestämmer värmeledningsförmågan i materialet beroende på dess innehåll av vatten och is. För att ändra ett önskat jordlayers värmeledningsförmåga i COUP-modellen skalas de automatiskt uppskattade funktionerna om med en skalningsfaktor (Scaling coefficient).

Värmeledningsförmågan beräknades från köldlaborationen för både frusna och ofrusna Aitikprover, så att hänsyn kunde tas till båda dessa parametrar vid beräkning av respektive lagers (materials) skalningsfaktor i COUP-modellen.

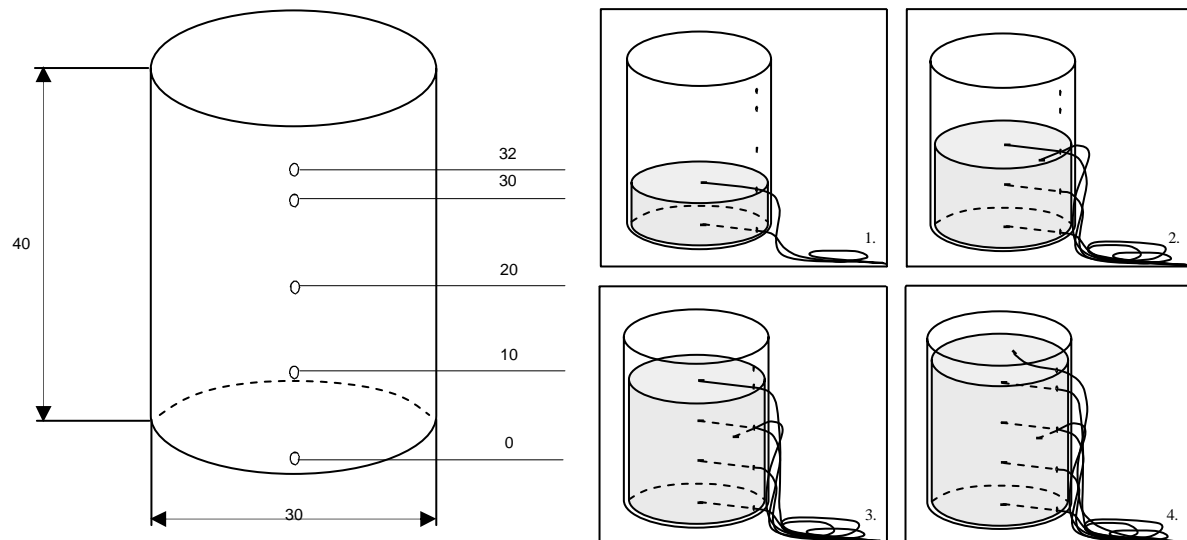
Skalningsfaktorerna för respektive lager (material) beräknas genom att ta medelvärdet av kvoterna mellan provets uppmätta värmeledningsförmåga och COUP-modellens uppskattade värmeledningsförmåga, för frusen och tinad jord. Resultatet av detta, medelkvoten, användes sedan som skalningskoefficient till lagren i modellen.

Utöver Aitik-materialen som undersöktes i köldlaboratorium har värmeledningsförmågorna för övriga material uppskattats av COUP-modellen. För Subb-materialet baseras denna uppskattning på uppmätt kornstorleksfördelning.

3.3.2 Genomförande

Vi utförde tester på fyra olika material som skickades från Aitikgruvan. Dessa var krossfraktioner i storlekarna 0-5 mm, 0-50 mm, 5-50 mm samt anrikningssand 0-2 mm. För att i största mån få en naturlig vattenhalt på proverna togs dessa fritt liggande i markskiktet där regn, vind och avdunstning kan verka. Transporten till Uppsala skedde i förslutna hinkar.

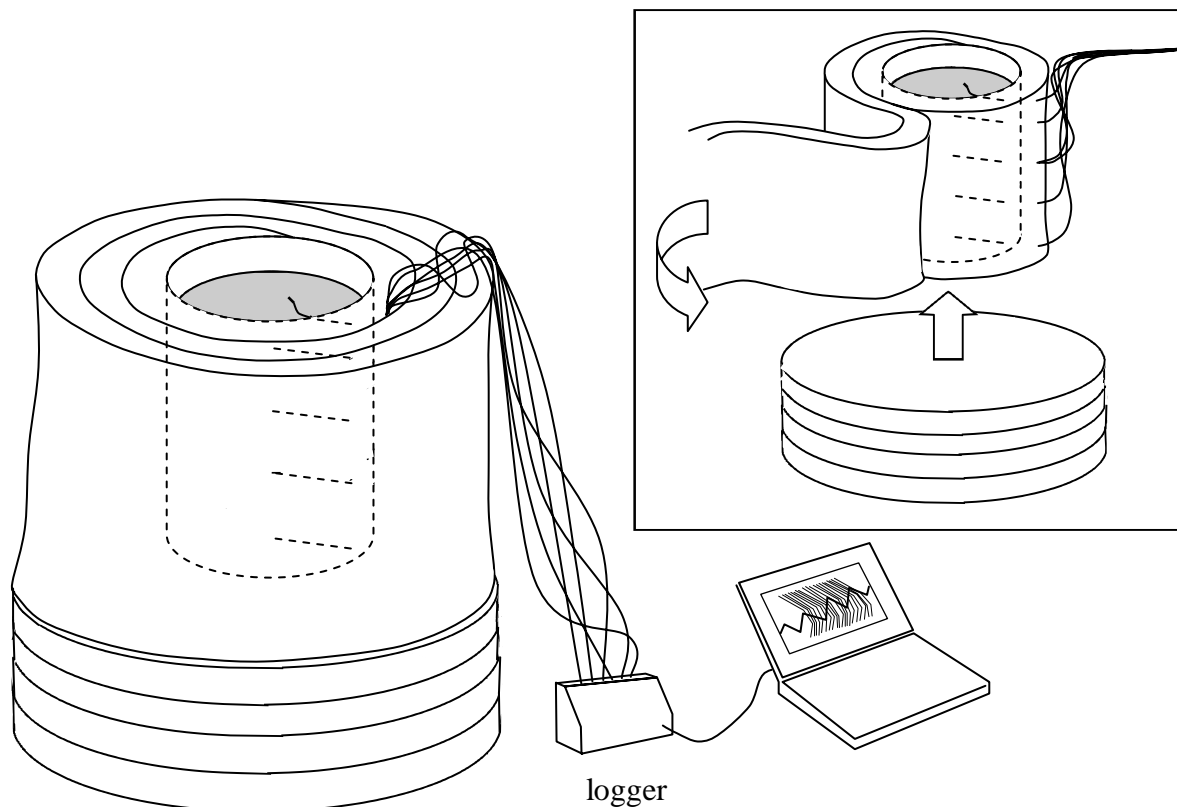
Från SLU i Ultuna fick vi låna en cylinder som används för mätning av jords värmeledning. På cylinderns sidor finns det borrarade hål där man kan föra in temperaturgivare. Hålen sitter på nivåerna (från botten räknat) 0 cm, 10 cm, 20 cm 30 cm och ett vid 32 cm där vi hade en givare som mäter lufttemperaturen ovanför provet. På nivån 20 cm placerade vi ytterligare en givare alldeles innanför kanten på cylindern. Genom att jämföra värdena på 20 centimetersnivån kunde vi notera hur bra isoleringen fungerade. Det är viktigt att hindra köld från att ledas in i provet genom kablarna till temperaturgivarna. Därför förs givarna in från sidan istället för uppifrån. Jordmaterialet packades med cirka 50 kilos tryck var femte centimeter under påfyllningen. När jordnivån kommit upp till nivån för en temperaturgivare såg vi till att givaren hamnade i mitten, packade jorden och fortsatte att fylla (figur 3.4).



Figur 3.4 Till vänster visas en 40 cm hög provcylinder med 30 cm i diameter. Borrhålens avstånd från botten finns markerade. Till höger visas hur cylindern packades med material samtidigt som temperaturgivare placerades på avsett djup.

Eftersom COUP-modellen beräknar tjälnedträngning endimensionellt måste vi försöka efterlikna sådana förhållanden. Det gjorde vi genom att isolera cylindern med byggisolering i form av glasull av tjockleken 95 mm och värmeledningstal $\lambda = 40 \text{ W/mK}$. Isoleringen underifrån bestod av fem lager glasull medan sidoisoleringen var fyra lager (figur 3.5). Anledningen att vi hade mer under var att materialet där trycks ihop av cylinderns vikt.

Temperaturgivarna kopplades sedan till en logger av modell Campell 21 X. Logger och temperaturgivare kalibrerades med en nollgradig isslurry under omrörning. Inför de första mätningarna programmerades loggern att varje minut spara ett medelvärde av tätare uppmätta temperaturer. Detta ändrades senare till att spara medelvärden var femte minut på grund av begränsat minne i loggern.



Figur 3.5 Provcylindern isolerades med byggisolering både under och på sidan. Figuren till höger visar hur cylindern ställdes på 5 lager glasull och hur sidan kläddes in med fyra varv. Kablarna från temperaturgivarna fördes genom första lagret isolering innan de ledde ut uppåt (figuren till vänster) för att minska köldinträning längs med kablarna. En logger samlade upp mätvärden från temperaturgivarna under försöken vilket sedan överfördes till en dator.

När labbuppställningen var färdigmonterad placerades den tillsammans med loggern i ett frysrum på Geocentrum i Uppsala. Proverna fick stå minst så länge att de lägsta nivåerna nåddes av frysning.

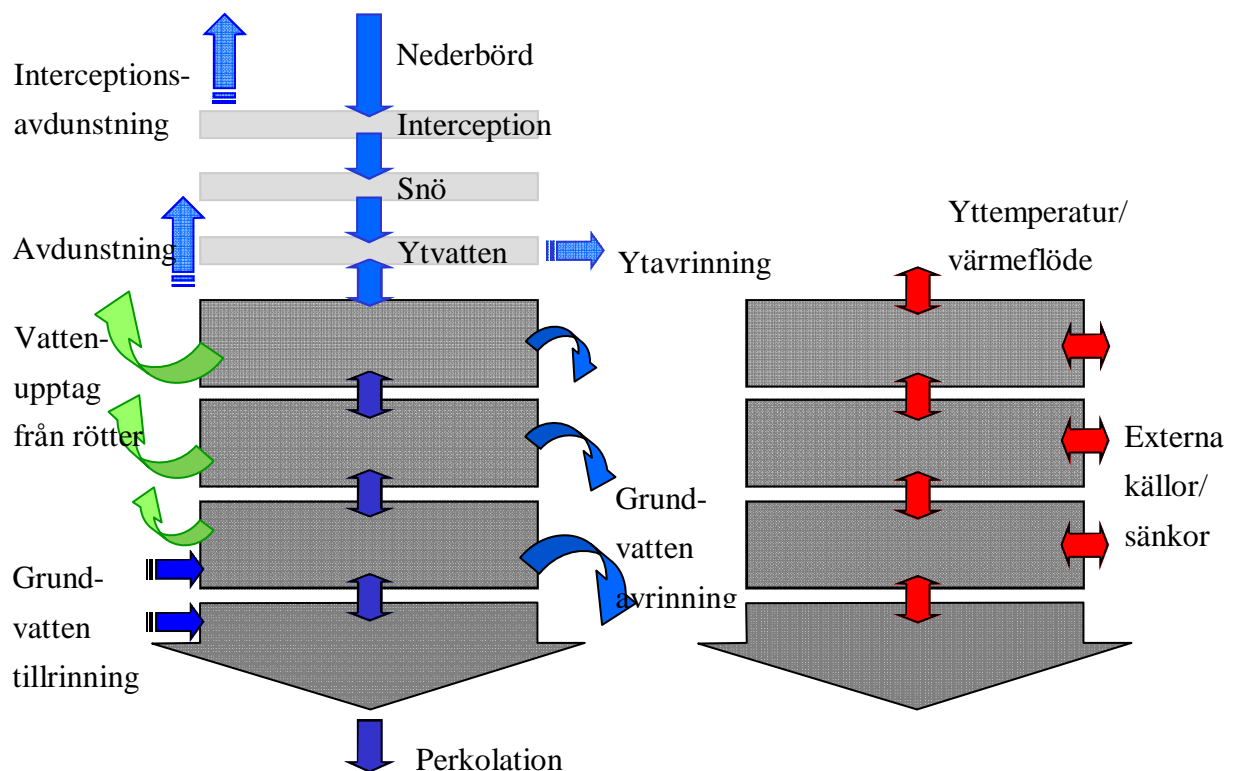
För att kunna beräkna värmeledningsförmågan i en jord behöver man också känna vattenhalten. Vi bestämde vattenhalten för två av jordarna, anrikningssanden samt 0-5 mm fraktionen. De två grövre jordarna ansågs ha en obetydlig vattenhalt. Försöket utfördes genom att vi mätte vikten på jordarna före och efter torkning och räknade ut en vattenhalt. Proverna stod i ugn 105°C i tre dygn.

3.4 COUP-MODELLEN

Som framgår av beskrivningen av tjälningförloppet är detta en mycket komplex process, där många olika parametrar hela tiden spelar in och påverkar. COUP-modellen är huvudsakligen uppbyggd kring två differentialekvationer för vatten- och värmeflöden (Hansson, 2002) och

kopplar samman flera separata modeller av ekosystemets olika delar. Genom att samtidigt beräkna vad som sker ovan och under jordytan, och relatera olika händelsers betydelse för varandra, skapas simuleringar med dynamiska händelseförlopp. (Jansson och Karlberg, 2001)

I figur 3.6 ges en schematisk beskrivning av hur COUP-modellen hanterar vatten- och värmeflöden mellan olika modellager. Modellens körvariabler inkluderar nederbörd, vindhastighet, luftfuktighet, kortvågig strålning och lufttemperatur.



Figur 3.6 Schematisk bild av COUP-modellens hantering av vattenflöden (till vänster) och värmeenergi flöden (till höger) i markprofilen. De grå fälten representerar de lager som COUP-modellen delar in markprofilen i för beräkning. Pilarna avser flöden av antingen vatten eller energi.

COUP-modellen kräver att användaren ställer in många parametrar för att kunna användas förtjänstfullt. I sitt grundutförande finns ett stort antal grundinställningar (default-inställningar) angivna, som i brist på noggrannare korrigering används vid simulering. Nedan presenteras de inställningar som gjorts i COUP-modellen för att anpassa denna efter de förhållanden som råder i och kring I-J-dammen, samt vilka inställningar som gjorts för att simulera Aitik-materialen så noggrant som möjligt. Avslutningsvis presenteras hur vi arbetat för att återskapa det klimat som påverkar dammen.

3.4.1 Grundläggande inställningar

COUP-modellen har använts till att studera skillnaden mellan hur olika material, och kombinationer av material, skyddar dammens tät kärna mot tjäle. För att möjliggöra detta har COUP-modellen ställts in för att på ett ungefärligt sätt motsvara de förhållanden som råder i I-J-dammen i Aitik. Målet med simuleringarna var att uppskatta ungefär hur djupt tjälen tränger ner för de olika alternativen, och på så sätt bestämma vilka konstruktioner som var mest intressanta att utvärdera med testsektioner i fullskala.

Alla justeringar av grundinställningar i modellen och inställningar av inparametrar har gjorts i samråd med COUP-modellens utvecklare och grundare Per-Erik Jansson. Tack vare hans erfarenhet och kunskap om modellens alla olika funktioner har våra uppskattningar om dammens tjälpåverkande förhållanden kunnat översättas till rimliga inställningar. Ändringarna av COUP-modellens grundinställningar (default-inställningar) presenteras utförligt i bilaga 4, för att möjliggöra för läsaren att avgöra om antaganden är rimliga. Detta omfattar:

- vilka parametrar som beräknades från funktioner och vilka parametrar som hölls konstanta till ett visst värde (default eller anpassat)
- vilka data som hämtades in i modellen från filer
- vilka delmodeller som var aktiverade respektive avstängda
- grundinställning av morändammens tät kärna, stödfyllning och den i dammen sluttande grundvattennivån
- hur modellen representerar olika konstruktioner med olika lager av material med olika tjocklek och egenskaper
- antal iterationer per simulerad dag och simuleringsperiodens början och slut

3.4.2 Specifika materialinställningar

För att kunna jämföra skillnader mellan olika Aitik-materials lämplighet att användas som tjälskydd ville vi ställa in modellen så noggrant som möjligt för dessa material var för sig. I detta avsnitt går vi igenom teorin som ligger bakom de uppskattningar och beräkningar av parametrar som ändrades i modellen. I bilaga 5 presenteras de inställningar som gjordes specifikt för varje material.

1. Värmeledningsförmågan, som kan justeras för olika material och lager i COUP-modellen, bestämdes för fyra intressanta material eftersom materialegenskapen spelar en central roll i tjälningförloppet.

2. Porositeten i jordskikt, som påverkar tjälningen, uppskattades.
3. Koefficienterna i Brooks-Coreys ekvation, som används i COUP-modellen för beräkning av hydrauliska samband, bestämdes med hjälp av ett program skrivet i MATLAB utifrån Aitik-materialens siktkurvor.

Värmeledningsförmågan

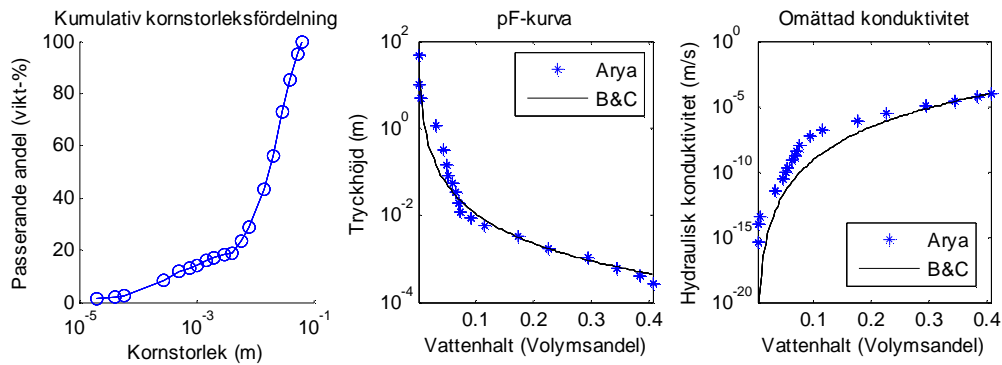
Värmeledningsförmågan (λ) ger ett mått på hur snabbt värmeenergin transporteras genom ett jordskikt vid temperaturgradienten 1°C cm^{-1} och beror av jordens temperatur, vattenhalt och sammansättning (kornstorleksfördelning, mineralinnehåll, porositet, packning, halt organiskt material etc.). Värmeledningsförmågan kan uppskattas från studier av temperaturförändringar på olika djup i prov som utsätts för köld under en tidsperiod enligt "Instantaneous Profile Method" (Jansson, 1996) se kapitel 3.3.3.

Porositeten

I COUP-modellen kan porositeten ställas in olika för varje horisont (material). Porositeten uppskattades för Aitik-materialen genom litteraturstudie, diskussioner med kunniga personer inom både markvetenskap och COUP-modellen, samt genom att titta och känna på materialen. För övriga material (tätkärna och stödfyllning) användes porositeten från databas.

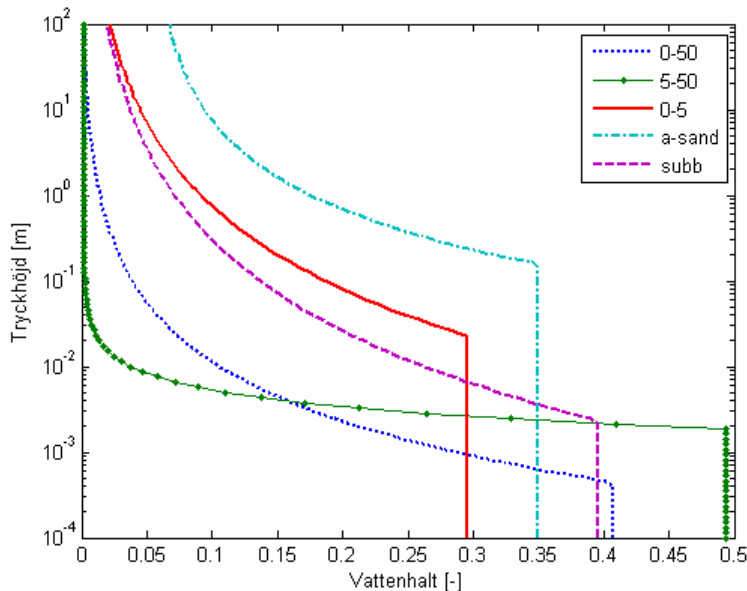
Brooks-Coreys koefficienter

COUP-modellen har en databas med flera hundra jordar vars samtliga porstorlekar är mindre än 2 mm (gränsen för sand). Modellen har inte utvecklats för att kunna beräkna konstanterna till Brooks-Coreys ekvation för material större än 2 mm. För att kunna modellera de Aitik-material med kornstorlekar upp till 50 mm använde vi istället ett MATLAB-program baserat på Arya Paris beräkningsmodell (Arya, m.fl., 1999, Arya & Paris, 1981). Programmet beräknar utifrån uppgifter om kumulativ kornstorleksfördelning (figur 3.7) punkter som motsvarar porstorleksfördelning i materialet. Programmet RETC (van Genuchten, m.fl., 1991) uppskattar utifrån detta en pF-kurva och en kurva för den omättade konduktiviteten vilket ger koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation. Noggrannheten vid uppskattningen av pF-kurvan är teoretiskt sett inte beroende av kornstorleken hos materialet och bör fungera väl för material med kornstorlekar upp till och med 50 mm. Programmet användes till att uppskatta koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation för alla Aitik-material utom anrikningssanden.



Figur 3.7 Den kumulativa kornstorleksfördelningen (till vänster) används i MATLAB-program för att beräkna pF-kurva (mitten) och en funktion för den omättade konduktiviteten (till höger). Utifrån detta gav programmet koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation.

Matlabprogrammets uppskattade pF-kurvor ges i figur 3.8.



Figur 3.8 Uppskattade pF-kurvor för Aitik-material från Matlabprogram som baseras på Arya Paris beräkningsmodell.

3.4.3 Klimatinställning

För att användaren ska kunna anpassa modellen efter det klimat som råder i ett undersökt området kan klimatdata (lufttemperatur, nederbörd, vindhastighet, luftfuktighet, molnmängd, etc.) läsas in från PG-filer. Dessa filer kan skapas med programvara som tillhör COUP-programmet. I vår studie köptes klimatdata in på licens från SMHI för den närliggande klimatstationen Gällivare automatstation. Dessa data används vid simuleringarna.

Då vi hade intresse av att simulera ett mäktigt snötäcke på dammen skapades också en PG-fil innehållande information om fiktiva snödjup. Denna snöfil lästes endast in vid simulering av

testsektion 4, som är överbyggd med nät vilka är tänkt att fånga upp och behålla snö på dammvallen. I bilaga 6 beskrivs hur COUP-modellen ställdes in för att simulera rätt meteorologiska förhållanden.

3.4.4 Genomförande av COUP-modellering

Simuleringarna med COUP-modellen genomfördes systematiskt (tabell 3.1) för att täcka in alla olika kombinationer av lösningar. Alla Aitik-material simulerades först med en mäktighet av 2,6 meter ovanpå dammen, då detta bedömdes vara ett slags medel vid inledande simuleringar av tjälnedträngning. Utöver detta simulerades alla kombinationer av två olika Aitik-material ovanpå varandra. Vid dessa simuleringar användes en mäktighet av 1,3 m för både det övre och undre materialet.

Tabell 3.1 *Alla simulerade kombinationer av Aitik-material. Översta horisonten anges i överkant och undre materialet i vänsterkant. I tabellens celler anges vår beteckning för kombinationen.*

Under/Över	A-sand	0-5	Subb	0-50	5-50
A-sand	A-s_2,6m	0-5_A-s	Subb_A-s	0-50_A-s	5-50_A-s
0-5	A-s_0-5	0-5_2,6m	Subb_0-5	0-50_0-5	5-50_0-5
Subb	A-s_Subb	0-5_Subb	Subb_2,6m	0-50_Subb	5-50_Subb
0-50	A-s_0-50	0-5_0-50	Subb_0-50	0-50_2,6m	5-50_0-50
5-50	A-s_5-50	0-5_5-50	Subb_5-50	0-50_5-50	5-50_2,6m

Marktemperaturerna samt övre och undre frostgräns plottades upp från simuleringarna för olika lagerdjup i markprofilen. Graferna redovisar vilket år tjäldjupet är som störst, och vilket lägsta djup som uppvisar negativa temperaturer.

3.5 NOGGRANNHET OCH TILLFÖRLITLIGHET

Detta avsnitt tar upp huvudpunkterna kring arbetet att validera COUP-modellen så att denna gav tillförlitliga resultat. Förutom att minimera felkällor vid användningen av modellen har även rimligheten i resultaten utvärderats genom en jämförelse mot analytiskt beräknade tjäldjup.

3.5.1 Begränsning av felkällor vid modellering

Grundinställningarna av COUP-modellen genomfördes tillsammans med Per-Erik Jansson och ämnesgranskare Klas Hansson. Modellen kalibrerades med kända klimatdata från SMHI

för Kiruna (KIRU6178.BIN) innehållande lufttemperatur, ångtryck, vindhastighet, nederbörd, globalstrålning och molnmängd. Efter den första kalibreringen ställdes modellen in med klimatdata från Gällivare automatstation, varpå modellen validerades mot kända förlopp och observationer för platsen. Klimatserien från Gällivare sträcker sig över en sexårsperiod, där vintern 2002/2003 normalt sett dimensionerade simuleringarna med största tjäldjup.

3.5.2 Referens-simulering med COUP-modellen

2006 mättes tjäldjupet i dammen på våren upp till 1,5 meter i slänten och 2,5 meter under krönet. Tjäldjupet i A-sand har också tidigare mätts upp till strax under 2 meter.

COUP-simulering av dammen utan överbyggnation gav att tjäldjupet i dagens dammkonstruktion borde ligga kring 2,8 m på krönet (bilaga 9).

3.5.3 Analytisk beräkning av tjäldjup

Tjäldjupet kan teoretiskt beräknas enligt Stefans formel:

$$Z = \sqrt{\frac{2 \times \lambda}{L'}} \times F \quad (8)$$

Z = tjäldjup [m], λ = värmeledningstalet i frusen jord [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], L' = effektivt latent värme [J m^{-3}], F = köldmängd [$\text{s } ^\circ\text{C}$] = $2,34 \times 10^8 \text{ s } ^\circ\text{C}$

$$L' = 333 \times 10^6 \times w \times \delta_D \quad (9)$$

$333 \times 10^6 \text{ [J m}^{-3}\text{]}$ är latent värmet för vatten, w = vattenkvoten [kg/kg], δ_D = torrdensitet [ton m^{-3}] = $2,7 \text{ ton m}^{-3}$

Stefans formel gäller för snöfri mark. Dessutom utförs nedanstående förenklande antaganden vilket sammantaget ger en överskattning av tjäldjupet.

- vattnet fryser helt vid 0°C
- temperaturen är konstant 0°C i ofrusen mark
- värmetransport nedifrån försummas
- termiska egenskaperna i jord är oberoende av temperaturen
- jordens tjällyftning med bildning av islinser försummas

4 RESULTAT

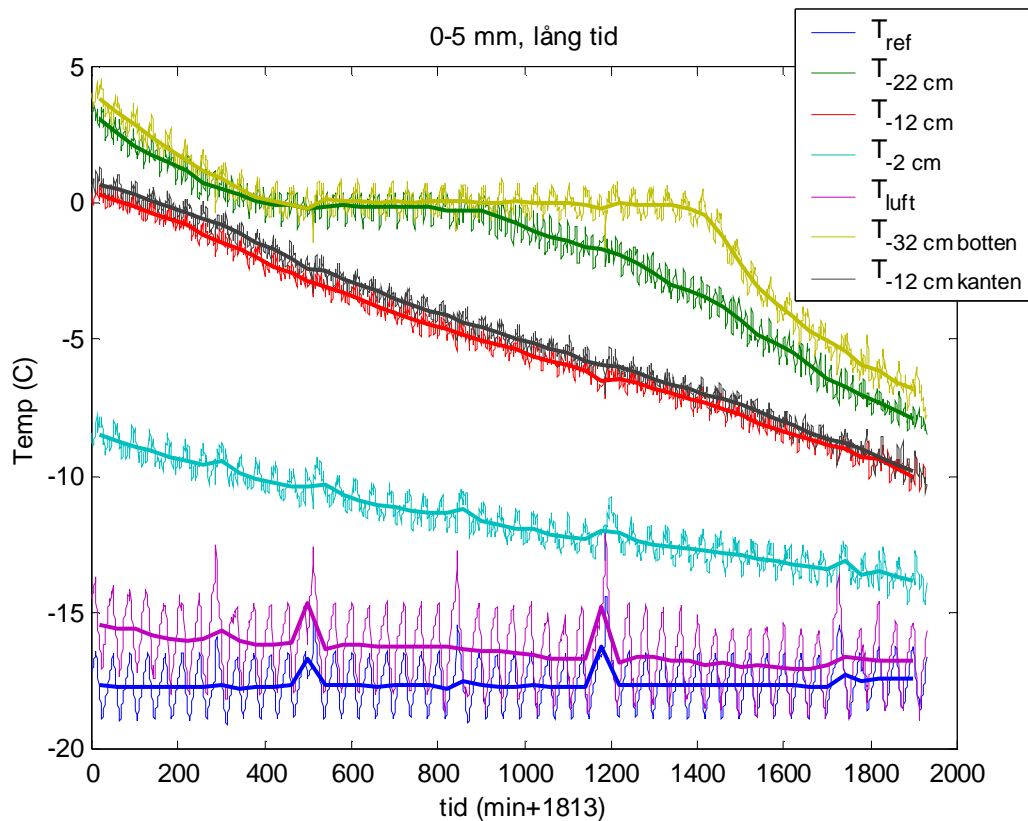
Vid inledningen av denna studie testades georadar som verktyg för att undersöka eventuella skador i dammen till följd av tjälning. Eftersom undersökningen inte kunde ge resultat med tillräckligt hög upplösning för att upptäcka tjälskador har vi valt att endast bifoga information om metoden och studien för intresserade i bilaga 14.

Detta kapitel tar först upp undersökningen av de olika materialen på köldlaboratorium i Uppsala. Förutom att ge underlag för att kunna beräkna värmeledningsförmågan för de olika materialen gav detta även viss kännedom om hur materialen fryser på olika sätt och olika snabbt. Efter detta återges resultatet från COUP-simuleringarna, vilket till stor del ligger till grund för bestämningen av testsektionernas konstruktioner. Sist i detta kapitel presenteras resultatet av tjäldjup i dammen som beräknats med Stefans formel.

4.1 BESTÄMNING AV VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA

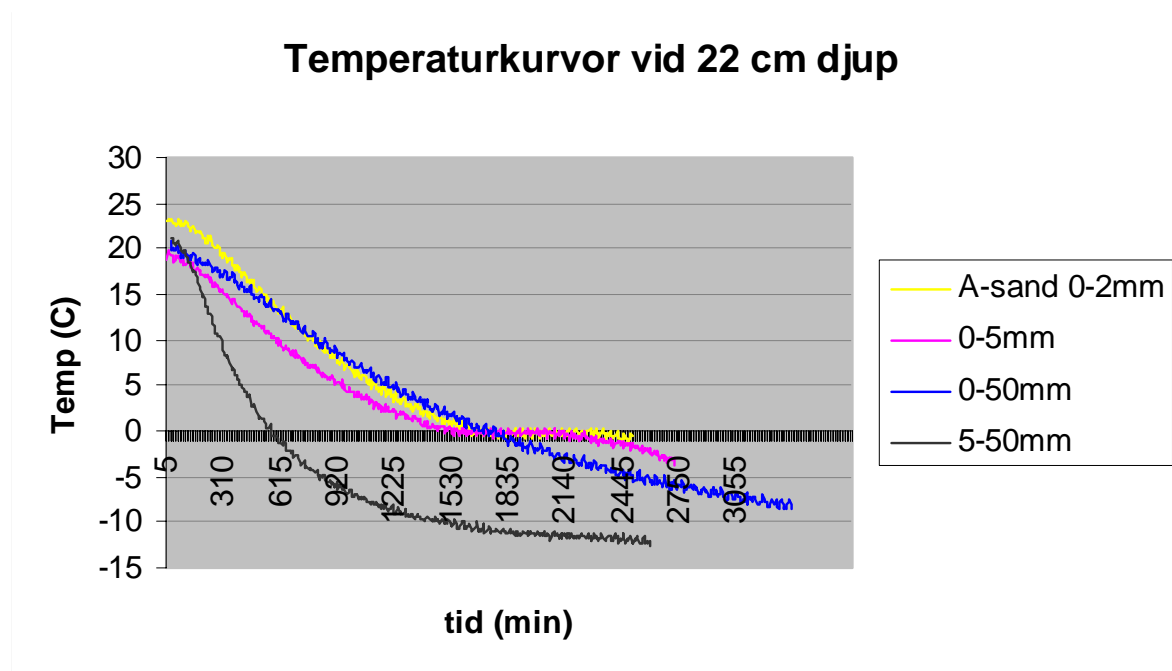
4.1.1 Undersökning av jordprover på köldlab

I bilaga 2 presenteras resultatet från köldlaborationen i form av grafer som visar temperaturförändring på olika djup i de olika materialen. Ett exempel på resultaten redovisas för materialet 0-5 mm i figur 4.1. Bilden visar temperaturerna på fem olika platser i jordprovet (vid djupen 2, 12, 22 och 32 cm, samt botten och längs med kanten på 12 cm) och två utanför (en vid ytan och en referensmätning på sidan om cylindern). Figuren visar att temperaturen i frysrummet (T_{ref}) varierade nästan 3 grader kring -18°C . Vidare pekar resultatet på att temperaturen går ned långsammare i provet ju längre ned temperaturgivaren sitter placerad. Detta tyder på att isoleringen under och på sidan av cylindern har haft önskad effekt.



Figur 4.1 Bilden visar temperaturvariationer från 7 olika temperaturgivare vid frys försök i laboratorium av materialet 0-5 mm. Figuren visar tiden mellan minut 1813 och 3713 (1813+1900 min), dvs. en tid in i köldförsöket.

För att jämföra resultaten mot varandra redovisas i figur 4.2 temperaturkurvorna från temperaturgivarna på 22 cm djup från de olika proven. Detta är det djup där vi förväntar oss tydligast jämförelse mellan materialen samtidigt som vi har minst störningar i form av köldinträngning från sidorna.



Figur 4.2 Temperaturkurvor från köldförsök vid 22 cm djup i de fyra Aitik-materialen. Till en början ligger temperaturerna i jordproven på detta djup mellan 18 och 23 °C. Temperaturen sjunker sedan olika snabbt i de olika materialen. Den platå som uppträder kring 0 °C för materialen 0-5mm och A-sand beror på motståndet att fasomvandla vatten till is.

Materialen börjar frysa på 22 cm djup när temperaturen når ungefär noll. Den energikrävande processen att frysa vatten till is syns i figur 4.2 som en platå i temperaturkurvan för de material som innehåller mer vatten. De torrare materialen 0-50 mm och 5-50 mm passerar förbi nollnivån utan större motstånd. Vid mätningarna presenterade i diagrammet frös materialet 5-50 mm överlägset snabbast trots att temperaturen i frysrummet var mildast för detta försök (-12°C jämfört med -18°C för övriga redovisade försök).

4.1.2 Analytiskt beräkning av värmeledningsförmågor

Utifrån mätningar i köldlaboratorium har materialens värmeledningsförmågor beräknats enligt ”Instantaneous Profile Method” (3.3.1) för materialen A-sand, 0-5 mm, 0-50 mm och 5-50 mm. Där ges att värmeledningsförmågan kan beräknas ur ekvation (7).

Hur beräkningarna genomfördes för varje prov exemplifieras och förklaras i bilaga 3 för ett exempel (materialet 0-5 mm, fruset prov). Eftersom värmeledningsförmågan varierar kraftigt mellan fruset och icke fruset tillstånd beräknades båda fallen för samtliga jordar.

Vi antog vid beräkningarna att kompaktdensitet för mineralmaterialet i samtliga prover är 2,65 [g cm⁻³] för att beräkna de olika provernas vattenhalter. Vidare antogs porvolymen i de olika proverna vara: A-sand: 35 %, 0-5 mm: 30 %, 0-50 mm: 40 % (pga liten andel fint

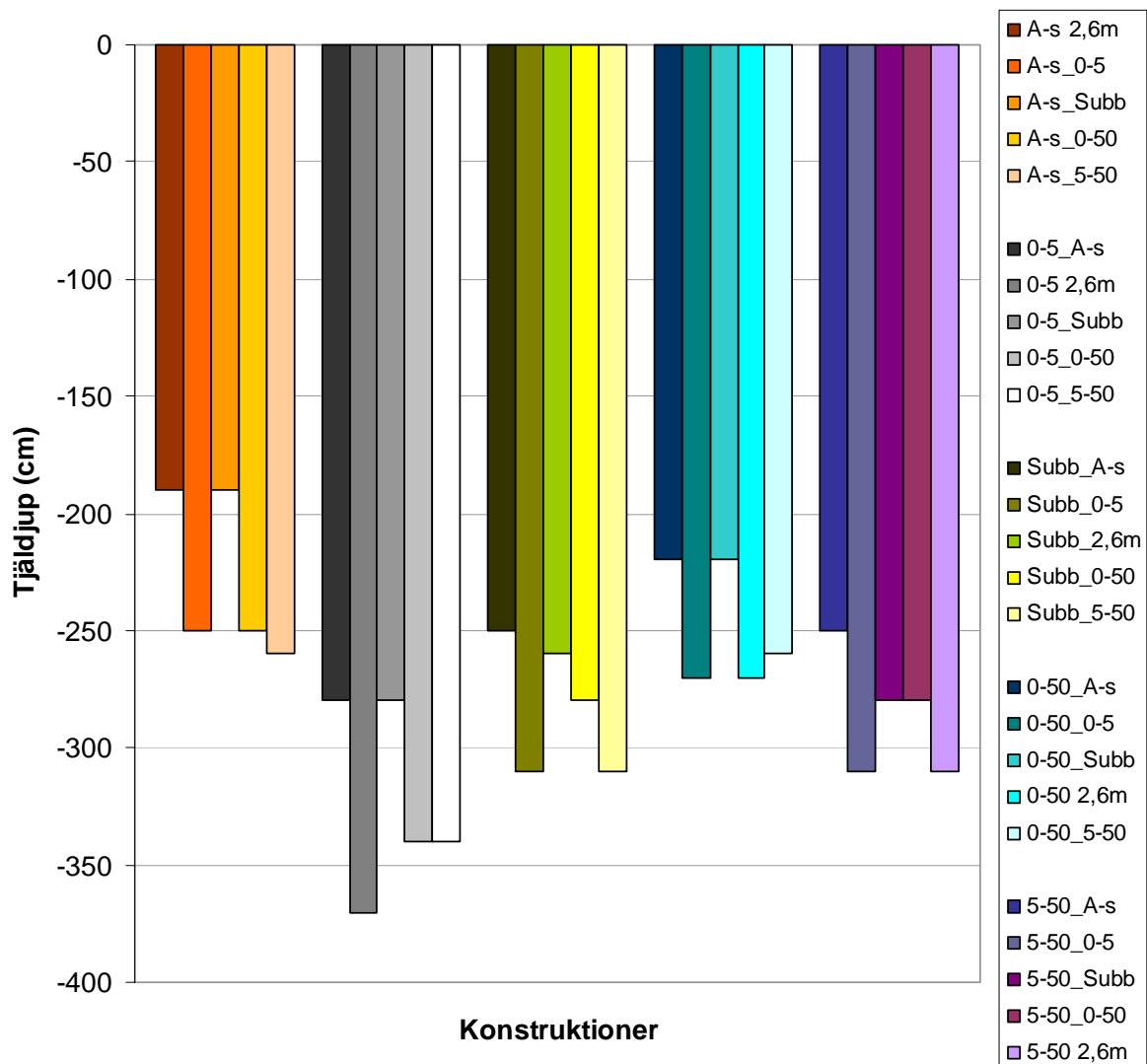
material), 5-50 mm: 50 %. Vi antog även att andelen organiskt material är försumbart. Resultatet från beräkningarna av värmeledningsförmågor presenteras i tabell 4.1 tillsammans med antagande om is- respektive vatteninnehåll samt uppskattning av materialens porvolym.

Tabell 4.1 Presentation av beräknad värmeledningsförmåga för olika frusna och ofrusna material samt vilka antaganden som gjorts vid beräkningarna när det gäller porvolym, is- och vatteninnehåll.

	Värmeledningsförmåga [W K ⁻¹ m ⁻¹]	Antagande is- och vatteninnehåll (v)	Antagande porvolym [%]
$\lambda_{A\text{-sand tinad}}$	1,1	9 % v	35
$\lambda_{A\text{-sand frusen}}$	0,5	8 % is 1 % v	
$\lambda_{0\text{-5mm tinad}}$	3,14	10 % v	30
$\lambda_{0\text{-5mm frusen}}$	1,29	9 % is 1% v	
$\lambda_{0\text{-50mm tinad}}$	1,0	3 % v	40
$\lambda_{0\text{-50mm frusen}}$	0,63	3 % is 0 % v	
$\lambda_{5\text{-50mm tinad}}$	2,6	2 % v	50
$\lambda_{5\text{-50mm frusen}}$	1,47	2 % is 0 % v	

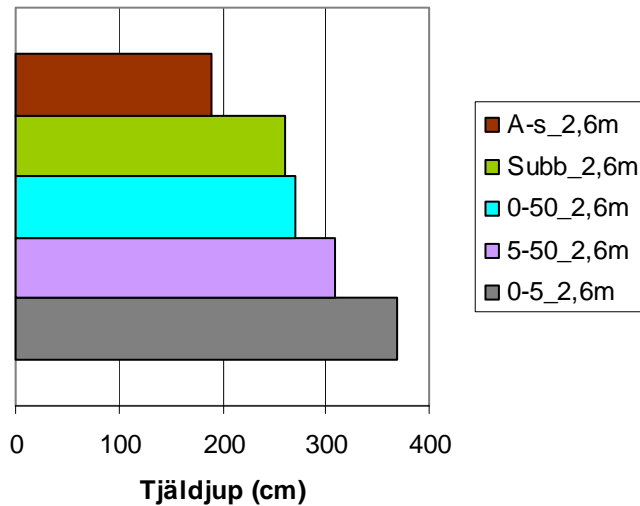
4.2 SIMULERING AV TJÄLDJUP

Resultaten av alla COUP-simuleringar redovisas i bilaga 9. I de fall största tjäldjupet uppnåtts under den första eller andra vintern i simuleringsperioden har vi valt att bortse från dessa resultat, eftersom vattenhalterna i marklagren ännu inte hunnit stabilisera sig till rimliga nivåer. Vanligtvis är det år 2003 som uppvisar de djupaste tjäldjupen. En sammanställning av materialkombinationernas största tjäldjup från simuleringarna av Aitik-materialen anges i figur 4.3 För flera av dessa simuleringar har tjäldjupet nått ner i tätkärnan, vars simulerade skikt börjar 2,6 meter under markytan. Oavsett detta kan resultaten användas för att rangordna olika materials tjälskyddande förmåga mot varandra.



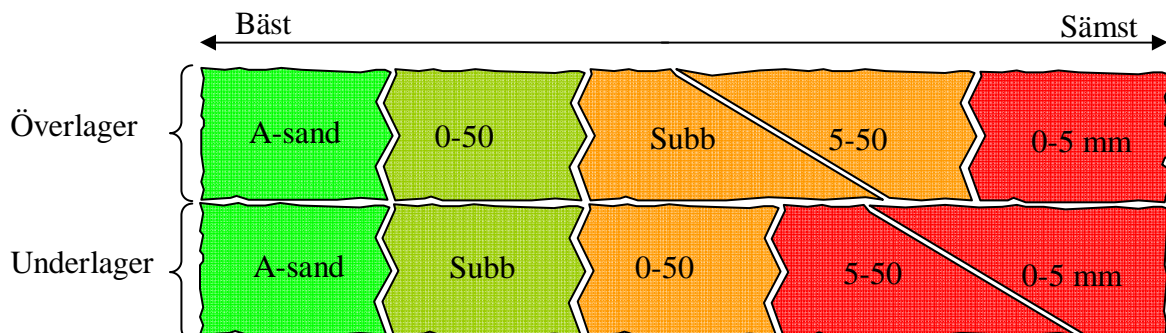
Figur 4.3 Tjäldjup presenteras för olika kombinationer av material som simulerats med COUP-modellen för tidsperioden 1999-2006. Staplarna längst till vänster visar A-sand, nästa kluster av staplar motsvarar 0-5mm, sedan subb, 0-50mm och sist 5-50mm. Beteckningarna står för: A-s = anrikningssand, 0-5 = 0-5 mm, Subb = sublimationsmaterial (0-40 mm), 0-50 = 0-50 mm, 5-50 = 5-50 mm. Namnet på det överst liggande materialet står över namnet på det underst liggande.

I figur 4.3 framgår det tydligt att de olika materialen har olika förmåga att begränsa tjäldjupet. De simuleringar som genomförts med endast ett sorts material skiljer sig med 180 cm från den simulering med A-sand som hade minst tjälnedträngning till materialet 0-5 mm vars tjäle trängde ned djupast. I figur 4.4 presenteras en sammanställning:



Figur 4.4 Sammanställning av tjälldjupet i fem homogena konstruktioner. A-sand: 190 cm, Subb: 260 cm, 0-50 mm: 270 cm, 5-50 mm: 310 cm, 0-5 mm: 370 cm

Materialen uppvisar även olika goda tjälbegränsande förmågor när de används över respektive under andra material. Rangordningen redovisas grafiskt i figur 4.5



Figur 4.5 Rangordning av materialens tjälbegränsande förmåga som övre respektive undre material i en kombinerad konstruktion. Ju längre till vänster materialet befinner sig desto bättre är dess egenskaper i förhållande till övriga material.

Överliggande material

1. A-sand är överlägset bäst, framförallt i kombination med underliggande Subb
2. 0-50 mm är näst bäst, och helst ovanpå A-sand eller Subb
3. Subb och 5-50 mm är exakt lika bra som överliggande material

Underliggande material

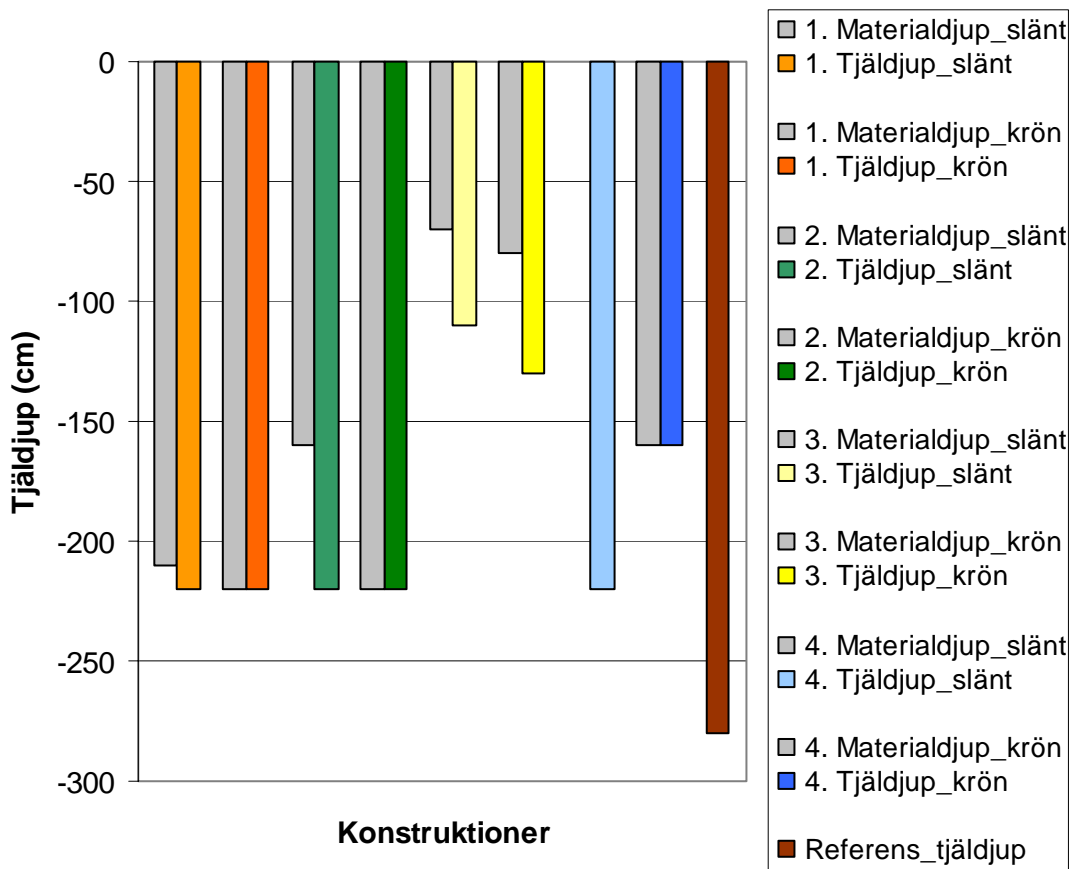
- A-sand är även bäst som underliggande material
- Subb är i vissa fall lika bra som A-sand, och annars endast lite sämre
- 0-50 mm är tredje bästa underliggande material

4. - 5-50 och 0-5 mm är ungefär lika dålig
5. 0-5 mm är klart sämst i modellen -

4.3 COUP-SIMULERINGAR AV SPECIELLT UTVALDA KONSTRUKTIONER

Även de fyra konstruktioner som byggdes för att utvärderas som tjälskydd i Aitik simulerades i COUP-modellen (bilaga 10), men utan det erosionskydd av sprängsten som täcker uppströmssidan av samtliga konstruktioner. Simuleringarnas djupaste tjälnedträngningar redovisas i figur 4.6 tillsammans med grå staplar som symboliserar djupet av de olika överbyggnationerna. Med hjälp av dessa kan läsaren förstå hur djupt tjälen har trängt ner i tät kärnan.

Den sista specialkonstruktionen (Referens) motsvarar dammen utan någon överbyggnation, som referens för att kunna jämföra COUP-modellens simulerade tjäldjup mot det faktiska tjäldjup som konstaterades på våren 2006. Vid simuleringen användes modellens grundinställningar med 2 meters tät kärna ovanpå stödfyllning. På krönet simulerades ett 0,5 meter tjockt bärlager av Aitikmaterialet 0-50 mm. Ingen simulering har gjorts för dammens uppströmsslänt eftersom erosionskyddets tjälpåverkande egenskaper är okända.



Figur 4.6 Diagrammet redovisar simulerade tjäldjup i speciellt utvalda konstruktioner. Tjäldjupen redovisas separat för simulering av slänten och för krönet, med en grå stapel intill varje som symboliserar konstruktionens djup och därigenom hur nära tättkärnan tjälgränsen når. Om den färgade stapeln når under den gråa innebär detta således att tjäle når under konstruktionen och ner i tättkärnan. Observera att inget material annat än erosionsskydd av sprängsten ligger ovanpå slänten i konstruktion 4. Erosionsskyddens tjocklek redovisas inte.

Referenssimuleringen av dammen gav ett största tjäldjup på 280 cm. Simuleringen av snöfångare (konstruktion 4) gav 130 cm tjäldjup och isoleringsskivorna (konstruktion 3) uppskattas begränsa tjäldjupet till 90 cm. Tjälen i konstruktion 1 är grundare än i konstruktion 2, men båda avrundades till 220 cm djup.

Anledningen till att erosionsskydden inte simulerades är vår osäkerhet om dess tjälskyddande egenskaper. Eftersom erosionsskyddet av sprängsten bromsar upp kylande vind, samlar upp isolerande snö, innehåller stora isolerande luftfickor och leder kyla sämre än om inget erosionsskydd funnits på plats förväntar vi oss att de verkliga tjäldjupen i konstruktionerna begränsas i förhållande till simuleringarna. Detta gäller uppströmsslänten på alla

konstruktioner, där konstruktion 1 och 2 har 1,0 respektive 1,5 meter tjockt erosionskydd, och konstruktion 3 och 4 har ett 1,9 meter mäktigt lager av sprängsten.

4.4 ANALYTISK BERÄKNING AV TJÄLDJUP

Resultatet av beräknade tjäldjup i Aitik-materialen enligt Stefans formel (avsnitt 3.5.3) redovisas i tabell 4.2 tillsammans med använda värden uppmätta på köldlabb för värmeledningstalet i frusen jord och vattenkvoten.

Tabell 4.2 Redovisning av analytiskt beräknade tjäldjup för olika Aitik-material enligt Stefans formel. Även använda värden för värmeledningstalet (λ_f) och vattenkvoten (w) presenteras

Material	λ_f (W m ⁻¹ K ⁻¹)	w (-)	Tjäldjup (m)
A-sand	0,5	0,085	1,78
0-5 mm	1,13	0,09	2,61
0-50 mm	0,63	0,03	3,37
5-50 mm	1,47	0,02	6,31

Eftersom inget köldförsök genomfördes med subb-materialet och inga uppgifter finns om dess värmeledningstal kan inget teoretiskt tjäldjup beräknas för detta.

5 DISKUSSION

I detta kapitel diskuteras först noggrannheten av studiens angreppssätt. Efter detta tolkas resultaten från undersökningen för vart och ett av de byggnadsmaterial som studerats, vilket sedan ligger till grund för konstruktionen av testsektionerna som presenteras i kap 7. Avslutningsvis i detta kapitel diskuteras sedan studiens noggrannhet och felkällor.

5.1 VALET AV ARBETSMETODIK

Detta är ett grundligt tillvägagångssätt för att utreda vilket tjältskydd av tätkärnan som är det mest kostnadseffektiva för I-J-dammen i Aitik. Inom ramen för denna studie har hänsyn tagits till olika materials teoretiska förmåga att fungera som tjältskydd och till praktiskt genomförda tjälningförsök i köldlaboratorium, där frysningsförloppet kunde studeras i detalj för olika material. Vidare har COUP-modellen använts för att rangordna materialens lämplighet att användas som tjäldjupsbegränsande konstruktioner på dammen och avslutningsvis sker ett fullskaletest av effekten av 4 föreslagna konstruktioner på I-J-dammen i Aitik under vintern 2007/2008. Vid konstruktion av dessa fullskaleförsök har hänsyn även tagits till hållbarhet, dammsäkerhet, underhållsbehov och framtida planer för dammen.

För samtliga intressanta konstruktioner har uppskattningar avslutningsvis gjorts av skyddens fullskalekostnad vilket har fällt avgörandet om bästa utformning.

5.2 DE STUDERADE MATERIALENS EGENSKAPER

För de fyra material (A-sand, 0-5 mm, 0-50 mm och 5-50 mm) som studerades i köldlabbar har COUP-modellen kalibrerats in så att funktioner för värmeledningsförmågan motsvarar mätresultaten. Från labbet finns även utförlig information om köldnedträngningshastighet i materialen och dess naturliga vattenhalt. För övriga simulerade material (Subb, isoleringsskivor och fångad snö) har andra anpassningar gjorts för att simulera materialen på ett rättvisande sätt. Nedan motiveras i tur och ordning vår bedömning av materialens egenskaper och lämplighet att användas i tjältskydd. Bedömningarna sammanfattas grafiskt i figur 5.1 i slutet av detta avsnitt.

5.2.1 A-sand

Anrikningssanden har mycket goda egenskaper att begränsa tjäldjup. Den finkorniga strukturen ger materialet en förhållandevis god kapillär och vattenhållande förmåga, vilket leder till en högre vattenhalt. Vid tjälning resulterar det i att mer vatten måste frysas vilket gör tjälnedträngning trögare. Jämfört med de övriga materialen bromsar A-sandens relativt täta struktur upptransport av latent värmeenergi som frigjorts när vatten frusit till is. Detta bidrar till att bromsa in tjälningförloppet.

A-sanden kan, liksom övriga studerade material, inte användas som översta lager på uppströmsslänt. Överst måste det alltid ligga ett erosionsskydd. På krönet avgörs A-sandens lämplighet att användas av kraven på bärighet. Mest troligt klarar A-sanden den måttliga men tunga trafik som krävs för dammdrift. Då materialet istället används längre in i en tjälskyddande konstruktion, i ett underliggande lager, är bärigheten inget problem och dess egenskaper mycket goda. Konstruktionerna måste dock innehålla tillräckliga övergångslager mellan A-sanden och omkringliggande material för att materialtransport mellan lagren ska förhindras.

Eftersom sandmagasinet ligger nära I-J-dammen blir transportkostnaderna låga för A-sand i tjälskydd. Tillgången på materialet är god.

5.2.2 0-5 mm

Vi förväntade oss att materialet 0-5 mm i det närmaste skulle ha lika tjälände egenskaper som A-sand baserat på vår subjektiva uppfattning om materialets höga innehåll av fint material. Till viss del bekräftades också detta vid köldförsöken i frysrum (figur 4.2) där materialet 0-5 mm frös mycket långsamt, dock snabbare än A-sand trots mindre extrem kyla.

Vid inställningarna av COUP-modellen saknades siktkurva för materialet, och istället uppskattades kornstorleksfördelningen på ett felaktigt sätt (bilaga 5). Detta resulterade mest sannolikt i att COUP-simuleringarna av materialet 0-5 mm är missvisande.

Oavsett resultaten utesluts materialet som byggnadsmaterial i ett fullskaligt tjälskydd på grund av den begränsade tillgången* av materialet, vilken beror på att det måste siktas fram.

Det är också något tveksamt om 0-5 mm har tillräckligt god hållfasthet för att användas som bärlager på krönet (materialet används dock redan som vägmateriäl på andra platser i området). Kostnaden bedöms vara 12,60 kr/ton* (1,5 ton/m³). Utöver detta tillkommer krossens lastningsavgift och transportkostnaden.

5.2.3 Subb

Subb-materialet (0-40 mm) är med sitt höga innehåll av fint material mest lik A-sand och 0-5 mm. Materialets större fraktioner hjälper samtidigt till att binda ihop materialet på ett bra sätt och hållfastheten är därför god.

* Information från samtal med Martin Lundkvist, NCC

COUP-simuleringarna antyder att subb-materialet fungerar mycket bra som underliggande material i en tjälskyddande konstruktion. Dess egenskap att användas som överliggande material på dammkrönet är dock sämre när det gäller att begränsa tjäldjupet.

Kostnaden (12 kr/ton, 1,7 ton/m³, plus krossens lastningsavgift och kostnader för transport från krossen)* förväntas blir relativt låga, endast högre än byggnation med A-sand och snöfångare. En av anledningarna till det lägre priset är krossens mycket goda tillgång på subb-material*.

5.2.4 0-50 mm

Materialet 0-50 mm innehåller en del fint material, men inte alls lika mycket som subb-materialet. Resultaten från köldförsöken (figur 4.2) visar att kölden transporteras ner långsamt (långsammare än för exempelvis subb), men att materialet fryser väldigt snabbt. Detta tyder på att 0-50 innehåller stora porer med luft som isolerar, men samtidigt inte håller så mycket vatten, vilket tar tid att frysa. Den latent värmeenergin som avges när vattnet fryser transporteras snabbt bort från tjälgränsen genom det porösa materialet och bidrar inte till att bromsa upp frysningen. COUP-simuleringar gav att 0-50 mm fungerar bra som överliggande material men mindre bra som byggnadsmaterial längre ner i en konstruktion.

Materialet ger god bärighet och används därför ofta som vägmaterial i området. 2500-3000 ton 0-50 mm kan produceras i krossen varje dygn. Trots detta uppstår det ofta en brist på materialet eftersom efterfrågan är stor. Materialet kostar 40-50 kr/ton (1,7 ton/m³)*. Eftersom även detta material måste hämtas ända borta på krossen resulterar det i att 0-50 mm är det dyraste materialet som vi undersökt, förutom isoleringsskivorna.

5.2.5 5-50 mm

5-50 mm innehåller mycket luft i stora porer. Avsaknaden av fint material gör att både den vattenhållande egenskapen och kapillärförmågan är låg. Materialet har en god dränerande förmåga vid infiltration ovanifrån, och är normalt mycket torr. Vid frysningförsök i köldlabb (figur 4.2) gick kölden ner i materialet överlägset snabbast och ingen tröghet syns vid själva isbildningen (vid 0°C). Den snabba tjälnedträngningen förklaras av att mycket lite vatten måste frysas och att transport av latent värme kan ske med litet motstånd upp till markytan. Även vid COUP-simuleringar framstår 5-50 mm som dåligt lämpad att användas i en tjäldjupsbegränsande konstruktion både som överliggande och framförallt som underliggande material.

* Information från samtal med Martin Lundqvist, NCC

Materialet 5-50 mm har annars god hållfasthet och dränerande förmåga vilket gör att det används mycket i området bl.a. på vägar som bärlager. Kostnaden förväntas bli 12,60 kr/ton (1,5 ton/ m³) för Boliden och liksom alla material utom A-sanden måste även 5-50 mm transporteras ända från krossen.

5.2.6 Isoleringskivor

Isoleringskivor har en bra isolerande förmåga, p.g.a. dess luftiga men samtidigt täta konstruktion. Materialet begränsar både vätskor och gas att transporteras genom skivorna och fungerar därför som ett lock som håller kyla ovanifrån borta samtidigt som borttransport av jordvärme hindras.

Under isoleringskivorna måste materialet jämnas ut så att inte skivorna knäcks vid belastning ovanifrån. Ovanpå skivorna måste ett bärlager läggas för att dels fördela vikten från fordon eller annat, samt dels hålla plattorna kvar i position vid exempelvis vindpåverkan.

Isoleringskivorna som simulerats med COUP-modellen har simulerats på ett oprecist sätt och resultatet är därför osäkert.

Inköpskostnaden för olika isoleringskivor är relativt hög vilket till stor del förklaras av höga fraktkostnader. Utöver detta kostar anläggningen med över- och underlager av lämpligt material en ansevärd del.

Inre erosion av material i fyllnadsdammen kan leda till dammbrott. När vatten eroderar bort material i dammen leder detta ibland till synliga sjunkhål på ytan, vilket kan alarmera drifttekniker om att något har hänt och kanske håller på att hända. Isoleringskivor kan dölja sådana gropar på dammen. För att komma runt detta problem har isoleringskivor på vissa håll delats upp i mindre delar, som på så sätt ska kunna följa med underlaget bättre vid markrörelser. Detta leder dock till att materialet får en sämre köldisolerande förmåga och tar längre tid att placera ut.

5.2.7 Snö

Eftersom snön normalt sett blåser bort på dammen har endast studier genomförts av de tjältskyddande egenskaperna hos snö fångad i snöfångare. Denna snö är hårdare packad* vilket ger den sämre isolerande egenskaper p.g.a. minskat luftinnehåll vilket ger högre termisk ledningsförmåga. Vid COUP-simuleringarna användes därför ett 3 gånger högre värde för snöns densitet för att simulera detta. Resultatet visar att tjäldjupet begränsas till 130-160 cm

* Intervju med Tommy Markström, Vägverket, och Ludde Lundin, Skistar Åre

mot referensen på 280 cm djup. Simuleringen bygger på att 1,5 m snö samlas upp i en snöfångare från mitten av oktober till början av november, för att sedan smälta bort under en månad från första maj. För att användas som tjälskydd krävs det alltså att dammen skyddas tillräckligt under snöfångaren för att klara viss tjälnedträngning.

Snöfångare kan byggas relativt billigt, även om konstruktionen både kräver mycket arbetstid och är förknippat med diverse materialkostnader.

Material	Konstruktionsegenskaper		Ekonomi	Tillgång
	Överliggande	Underliggande		
A-sand	Ok	Mkt bra	Billigast	Mkt god
0-5 mm	?	?	Billig	Begränsad
Subb	Ok	Bra	Billig	God
0-50 mm	Bra	Ok	Dyr	God
5-50 mm	Ok	Dålig	Billig	God
Isoleringskivor	-	Mkt bra	Dyr	Beställningsvara
Snö	Mkt bra	-	Billig	Beställningsvara

Figur 5.1 Sammanfattande bild av de studerade materialens lämplighet att användas i en tjälskyddande konstruktion med avseende på konstruktionsegenskaper, ekonomi och tillgång.

5.3 NOGGRANNHET OCH FELKÄLLOR

Vår uppfattning är att detta är ett mycket noggrant tillvägagångssätt för att kartlägga de bäst lämpade tjälskydden för I-J-dammen. Noggrannheten i COUP-simuleringarna är med de inställningar som gjorts tillräcklig för att med god säkerhet slå fast vilka av materialen som har bäst tjäldjupsbegränsande förmåga (utom för materialet 0-5 mm där kornstorleksfördelningen uppskattades felaktigt). Resultaten från COUP-simuleringarna har utgjort grunden för slutsatserna om tjälskyddens design i kombination med kostnaden och materialens konstruktionsegenskaper.

I detta avsnitt presenteras de största felkällor som har spelat in på olika sätt i arbetet.

5.3.1 COUP-simuleringarnas noggrannhet

COUP-modellen har primärt använts för att rangordna vilket/vilka av Aitik-materialen som har bäst egenskaper att användas som tjälskydd. Resultaten från simuleringar har även använts till att grovt dimensionera vissa testsektioners lagerdjup. Det slutgiltiga valet av konstruktionsdesign för tjälskydd i fullskala, med dimensionering av lagerdjup etc., baseras på fullskaleförsöken och inte COUP-simuleringar. Av denna anledning är det tillräckligt noggrant för vår studie att simuleringarna uppvisar rätt ”tendenser” mellan studerade konstruktioner, så att vi har kunnat dra rättvisande slutsatser om vilka material som har de bättre egenskaperna att tjälskydda I-J-dammen i Aitik. För det primära syftet med användandet av modellen är det alltså framförallt viktigt att sådan noggrannhet uppnås att de olika materialen kan jämföras sinsemellan.

Modellen kalibrerades tillsammans med COUP-modellens grundare och utvecklare Per-Erik Jansson och ämnesgranskare Klas Hansson. Modellkalibrering genomfördes för både välkänd klimatdata från Kiruna och specialbeställd klimatdata från Gällivare. Att modellen fungerar bra för båda dessa data tyder på att modellen är stabil.

En referenssimulering av dammen simulerades utan överbyggnationer. På så vis kunde kända tjälegenskaper hos fyllningsdammen jämföras mot COUP-simuleringen. Längst bak i bilaga 8 presenteras referenssimuleringens lufttemperatur, relativa luftfuktighet, nederbörd, vindhastighet, snödjup, globalstrålning, marktemperaturer på olika djup samt övre och undre frostgräns i marken. Denna information validerades genom samtal med initierade från KTH, Sweco och Boliden.

De analytiskt beräknade tjäldjupen (enligt Stefans formel, kap 3.5) redovisas i nedanstående tabell tillsammans med COUP-modellens simulerade tjäldjup.

Tabell 5.1 Redovisning av analytiskt beräknade tjäldjup i olika Aitik-material och jämförelse mot COUP-simulerade tjäldjup i motsvarande material

Material	Teoretiskt beräknat tjäldjup (m)	COUP-simulering (m)	Skillnad (m)	
A-sand	1,78	1,90	0,12	+ 6 %
0-5 mm	2,61	3,70	1,09	+ 42 %
Subb	-	2,60	-	-
0-50 mm	3,37	2,70	0,67	- 20 %
5-50 mm	6,31	4,32	1,99	- 32 %

Kommentar:

- Simulering av A-sanden stämmer väl överens med det teoretiskt beräknade tjäldjupet. Simuleringen ligger även mycket nära det uppmätta tjäldjupet på ca 2 meter.
- Eftersom siktkurvan för materialet 0-5 mm uppskattades mycket grovt ges ingen trovärdighet till COUP-simuleringarna av materialet. Materialet har även uteslutits som tjälskydd av kostnadsskäl.
- För Subb finns ingen teoretisk beräkning utförd eftersom vi inte har någon mätning av värmeledningsförmågan från köldlabb. Det simulerade tjäldjupet kan anses vara rimligt, även om materialet på förhand förväntades ge grundare tjäldjup.
- 0-50 mm beräknas teoretiskt 20 % högre än det simulerade tjäldjupet i dammen.
- Simuleringen av 5-50 mm gav liksom teoretiska beräkningar det största tjäldjupet. Beräkningarna gav dock hela 32 % djupare tjälnedträngning än simuleringen.

Observera att de förenklande antaganden som görs vid beräkning med Stefans formel resulterar i en överskattning av tjäldjupet. Sammantaget leder detta till att resultaten från COUP-simuleringarna är tillräckligt trovärdiga för de slutsatser vi dragit.

5.3.2 Felkällor

Det finns många källor till fel i dessa resultat. Detta har dock vägts in vid bedömningen innan slutsatser har dragits. Grundupplägget har varit att bestämma tjälskydden baserat på

information från köldlabb och COUP-simuleringar (litteraturstudie). Felkällorna diskuteras därför uppdelat nedan.

Köldlabb:

Köldlaborationer på utvalda material gjordes bland annat för att studera och jämföra hur de beter sig vid köldinträngning. Laboratorieresultaten användes även för att bestämma värmeledningsförmågan och porositeten hos olika material inför simulering med COUP-modellen. Vid laborationerna spelar framförallt vissa faktorer in på resultaten:

- **Jordens packningsgrad:** Vid packningen av jordcylindrarna är det nästan omöjligt att återskapa den packningsgrad som materialet skulle ha haft som konstruktionsmaterial i ett tjälskydd. Detta inte minst eftersom det beror på var på dammen materialet sedan är tänkt att byggas. Vi försökte packa alla prover lika mycket (50 kg tryck var 5:e cm) och hantera proverna på likvärdigt sätt. Packningen förväntas påverka materialens porositet, och därför kapillär förmåga, isolerande förmåga, hydraulisk konduktivitet, etc. Alla dessa faktorer spelar in vid tjälfrysning.
- **Vattenhalten:** Vattenhalten mättes upp för två material, medan övriga två efter transporten till Uppsala från Gällivare bedömdes vara så pass torra att deras vattenhalt var försumbar. Denna bedömning bekräftades i köldlabbet där temperaturen på olika djup i dessa prov snabbt passerade nollnivån, utan att uppvisa den platå på grafen som orsakas av segheten att fasomvandla vatten till is. Vatteninnehållet hos motsvarande material under bar himmel förväntas också vara torrare än mer finkorniga material varför resultatet visade på rätt tendens.
- **Isoleringsmaterialet:** Provcylindern isolerades med minst fem lager byggisolering av glasull längs med sidorna och botten. Temperaturmätningarna uppvisar inga tecken på köldinträngning annat än ovanifrån. Detta gör att försöksuppställningen får anses vara god, med en närmast endimensionell termisk ledning. Hade köld trängt in från sidorna hade de beräknade värmeledningsförmågorna hamnat för högt.
- **Varierande temperatur:** I frysrummet slogs köldaggregatet på någon minut så snart termostaten uppmätt temperaturer varmare än ett visst inställt riktvärde. På grund av detta varierade temperaturen i rummet hela tiden med 3 grader under frys försöken. Detta har haft en liten störning vid nedfrysningen av jordproverna men påverkat resultaten. Dataloggern som befann sig inne i frysrummet mätte en varierande referenstemperatur. Resultaten visar att temperaturerna varierar med samma period (dock inte samma amplitud) hela vägen ned i jordcylindern. På djupare skikt (under 10 cm) förväntas detta bero på störningar från referensmätningen snarare än från den

faktiska temperaturvariationen i frysrummet. Tolkningen av resultaten förväntas inte störas av detta.

COUP-simuleringar:

Vid modellkörningarna var det inte så viktigt att värmeledningsförmågan beskrevs exakt för det simulerade materialet. Vad som istället var viktigt var att värmeledningsförmågorna beskriver skillnaden mellan de olika Aitik-materialen på rätt sätt, för att med hjälp av COUP-modellen kunna rangordna vilka material som var bättre än andra. De laborativt framtagna värmeledningsförmågorna bedöms vara tillräckligt noggranna för detta ändamål.

- **Modellen:** COUP-modellen är 1-dimensionell och kan exempelvis inte simulera en riktig damms sluttande sidor och långsamma vertikala vattentransport från dammen. Då vi endast rangordnade olika materials lämplighet som tjälskydd baserat på modellen utgör dock inte detta en stor felkälla. Däremot kan simuleringarna av konstruktion 1-4 anses vara osäkra. Speciellt sektion 3 och 4 som har simulerats med stora förenklingar.
- **Grundinställningar:** När COUP-modellen ställdes in för att efterlikna I-J-dammen har många förenklingar gjorts som påverkar noggrannheten. T.ex. simulerades inga av dammens filterlager (detta påverkar den viktiga vattentransporten i dammen) eller det mäktiga erosionsskyddet av sprängsten. Vidare simulerades tjälfrysningen för den period som fanns tillgänglig med mest komplett klimatdata. Ingen hänsyn har tagits till köldmängdsdimensionerande 30- eller 100-års vintrar.
- **Materialinställningar:** Kornstorleksfördelningen för materialet 0-5 mm uppskattades på ett mycket grovt och felaktigt sätt, varför inga slutsatser kan dras utifrån materialets simulerade egenskaper. Dock föll dess lämplighet att användas på dess högre anläggningskostnader. Den hydrauliska konduktiviteten som gavs från uppskattningen av Brooks-Coreys koefficienter justerades inte ned från det högt uppskattade värdet 9504 mm/dygn. Antingen borde detta ha justerats ned eller också borde värdet för materialet 5-50 mm (7776 mm/dygn) ha justerats upp. Materialet 5-50 mm förväntas ligga högst av alla undersökta material. Tyvärr mättes heller inte porositeten på de material som analyserades på köldlabb och istället uppskattades materialens olika porositet inför simuleringar utifrån samtal med erfarna och kunniga personer. För att utreda effekten av detta genomfördes flera simuleringar där endast porositeten för materialen varierades mellan rimliga värden. Eftersom resultaten inte varierade så mycket är slutsatsen att modellen inte är så känslig mot felaktigt uppskattad porositet. Den tjälskyddande förmågan hos konstruktioner med A-sand förväntas variera en del beroende på var i sandmagasinet materialet hämtas. Ju närmre utsläppspunkterna av

slurry desto större genomsnittlig kornstorleksfördelning förväntas A-sanden ha. Detta beror på att tyngre partiklar sedimenterar snabbare än finare partiklar. Vår studie har gjorts på "medelfin" A-sand.

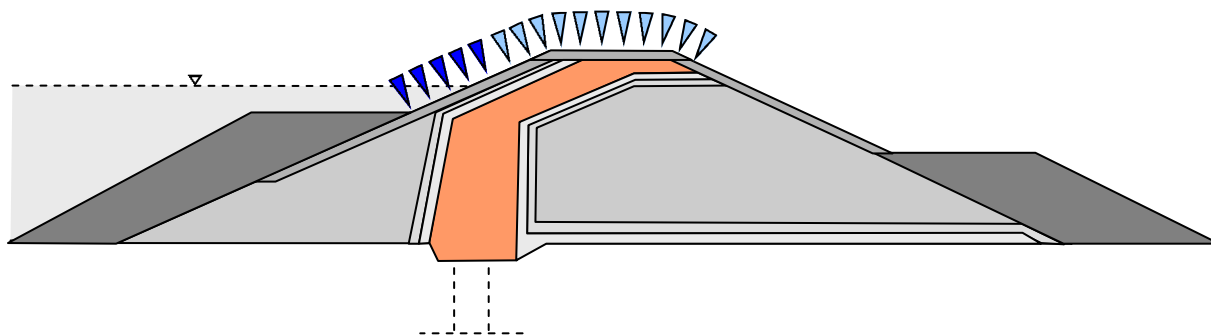
6 KONSTRUKTIONSUTFORMNING

I föregående kapitel beskrevs våra slutsatser om olika materials lämplighet att användas som tjälskydd på I-J-dammen i Aitik med avseende på teori, ekonomi och tillgänglighet. Här presenteras de bakomliggande val som styrde designen av fyra testsektioner som byggdes på dammen under hösten 2007. Avslutningsvis presenteras hur det gick till att bygga konstruktionerna samt hur och av vem testsektionerna är tänkt att utvärderas.

Det är sedan tidigare bestämt att I-J-dammen ska förstärkas med ett erosionskydd av sprängsten på uppströmsslänten. Detta innebär att alla testsektioner bör vara anpassade till dessa framtidsplaner. Redan idag finns ett stöd till erosionskyddet utlagt på dammens uppströmssida, med en krönbredd av 7-8 meter (5 höjdmeter under krönet). Eftersom erosionskyddet inte är lika mäktigt som övre delen av stödet finns det utrymme att bygga ett begränsat tjälskydd under erosionskyddet. Inte minst om det nuvarande erosionskyddet tas bort innan överbyggnation sker. I vårt specialfall innebär detta att kostnaden för släntutfyllnad av sprängsten inte läggs till kostnaden av de olika tjälskydden.

Inom överskådlig framtid kommer kanske I-J-dammen höjas för att möjliggöra större kapacitet för gruvbrytning i Aitik-gruvan. Detta innebär att tjälskyddande konstruktioner av ekonomiska skäl helst bör vara anpassade till en framtida dammhöjning.

Tät kärnan ligger nära ytan och åtkomlig för tjäle längs med uppströmsslänten, krönet och en liten bit ned på nedströmssläntens sida (figur 6.2). Det mest prioriterade området att skydda är dammens uppströmsslänt, och framförallt delarna under den övre dämmningsgränsen (blå pilar). Detta beror på att vatten från magasinet annars kan tränga in i en uppluckrad tät kärna och erodera sig igenom materialet och orsaka allvarliga skador. För att inte köldnedträngning från krönet ska störa utvärderingen av tjälskydd i slänten skyddas ändå dammen hela vägen över krönet.



Figur 6.1 Mörkblå pilar visar den mest köldexponerade delen av tät kärnan på I-J-

dammen. Vattennivån i magasinet ligger i figuren i höjd med högsta dämningssgränsen men är i verkligheten oftast lägre.

Fyra testsektioner av tjälningsskydd byggdes på I-J-dammen för att utvärderas under vintern 2007/2008. Inför konstruktionen av dessa har en rad val gjorts vilka presenteras nedan.

6.1.1 Konstruktion 1

En skiss av konstruktion 1 presenteras i bilaga 10. Utformningen bygger huvudsakligen på A-sandens mycket goda egenskaper att användas i en tjäldjupsbegränsande överbyggnad av tät kärnan.

På slänten kläs A-sanden in av ett så tunt erosionsskydd av sprängsten som möjligt vilket bestämdes till 1 meter. Mellan A-sanden och både det överliggande samt underliggande erosionsskyddet krävs det övergångslager som håller isär materialen från att blandas. I denna testkonstruktion fyller två stycken 0,3 meter tjocka lager av 0-50 mm denna funktion på uppströmsslänten. Sammantaget lämnar detta utrymme för ett 1,5 meter tjockt lager av A-sand. Simuleringar med COUP-modellen ger att tjälen når ner just till tät kärnan med denna konstruktion utan att ta hänsyn till inverkan från erosionsskyddet.

På krönet överbyggs 1,1 meter A-sand med ett 0,5 meter tjockt bärlager av 5-50 mm. Valet av 5-50 mm baseras på dess mycket goda konstruktionsegenskaper som överliggande bärlager och att materialet är relativt billigt att använda. Observera att dimensioneringen av lagrens tjocklekar inte bygger på relevant information om 30-års- eller 100-årsvintrar. Detta är bara en gissning om lämplig dimensionering delvis baserat på simuleringar med COUP-modellen (bilaga 10).

Eftersom A-sand är gratis för Boliden att använda och dessutom finns i närheten av dammen är materialet överlägset billigast. Tyvärr är det provisoriska övergångslaget 0-50 mm det dyraste materialet som undersökts från krossen, vilket drar upp totalkostnaden för tjälskyddet till uppskattningsvis 3 000 000 SEK (bilaga 12).

6.1.2 Konstruktion 2

Denna konstruktion (bilaga 11) är avsedd att användas som jämförelse mot konstruktion 1 och valet av design bygger på samma principer som denna.

Eftersom även ett erosionsskydd av sprängsten på slänten förväntas isolera dammen i viss utsträckning har konstruktion 2 ett tunnare underliggande lager av A-sand (1,0 meter tjockt i stället för 1,5 meter) med ett bättre dimensionerat erosionsskydd av sprängsten ovanpå (1,5 meter i stället för 1,0 meter). Lika tjocka övergångslager av 0-50 mm som används i konstruktion 1 är byggda över och under A-sanden.

Krönet har skyddats på samma sätt som konstruktion 1 med undantaget att bärlagret har bytts ut mot Subb i stället för 5-50 mm. Valet av Subb gjordes baserat på materialets låga kostnad i kombination med bra hållfasthet och goda tjälbegränsande egenskaper som överliggande material.

Denna konstruktion kostar uppskattningsvis 3 100 000 SEK (bilaga 12) att bygga i fullskala på dammen och blir alltså något dyrare än konstruktion 1. Konstruktionens styrka är att erosionskyddet har dimensionerats på ett bättre sätt, medan testperioden får utvisa om A-sanden och filterlagren räcker till för att skydda mot tjälnedträngning i släntens tåtkärna. Tjälgränsmätningar på krönen och erfarenheter av dess bärighet får utvisa vilket av dessa som är att föredra.

6.1.3 Konstruktion 3: Isoleringsskivor

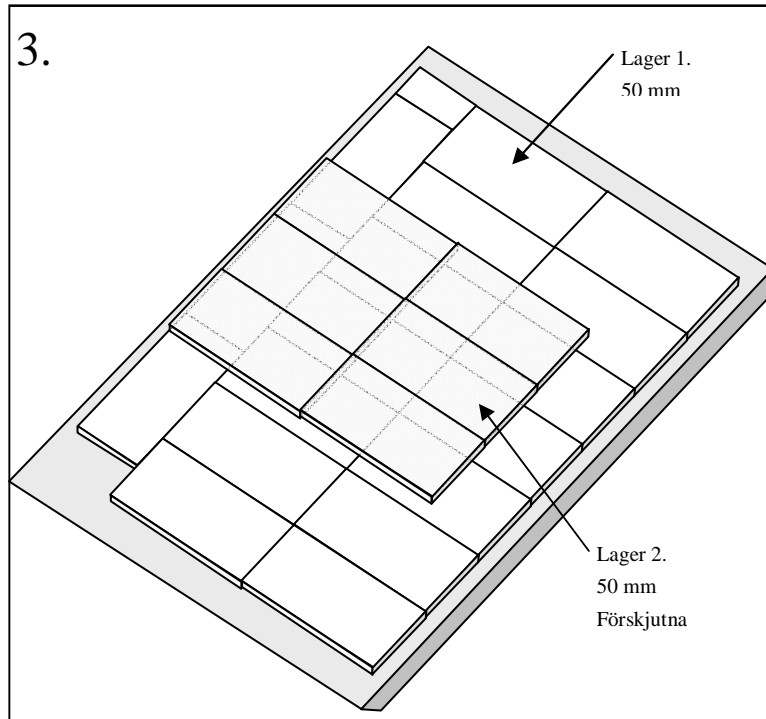
Medan konstruktion 1 och 2 i huvudsak bygger på att begränsa tjäldjupet så grunt som möjligt ovanför tåtkärnan bygger konstruktion 3 och 4 istället på principen att isolera dammen. Genom att begränsa utstrålning av den markvärme som finns lagrad i dammen ska tåtkärnan hållas fri från tjäle. Isoleringsskivor är sedan gammalt vanligt att använda som tjälskydd vid byggnationer av bl.a. vägar och fastigheter. Eftersom uppdragsägaren ville undersöka isoleringsskivornas lämplighet att användas som isolering och tjälskydd på dammen byggdes en sådan sektion.

Inom byggbranschen används i området normalt sett 10 cm tjock isolering med isoleringsskivor. Även vi valde denna tjocklek, trots att COUP-simuleringar visat att tjäldjupet då kanske når ner en bit ner i tåtkärnan.

På slänten valdes det billigaste fabrikatet på cellplast. Underlaget jämnades först till med 0,3 meter tjockt lager av Subb (bilaga 11). Ett dubbelt lager av isoleringsskivor (5 x 120 x 240 cm) placerades sedan ut med överlappande kanter (figur 6.2). För att fördela ut tyngden från sprängstenarnas vassa kanter placerades även ett 0,3 meter tjockt lager av Subb ut mellan isoleringsskivorna och erosionskyddet. Subb är billigt och har framförallt som underliggande material mycket goda tjäldjupsbegränsande egenskaper. Erosionskyddet byggdes 1,9 meter tjockt enligt Swecos rekommendation om lämplig dimensionering av erosionskydd.

Innan skivorna placerades ut på krönet jämnades det tidigare bärlagret ut med hyvel, så att inte skivorna knäcktes vid belastning ovanifrån. Kraven på isoleringsskivornas hållfasthet under en trafikerad väg gjorde att ett dyrare fabrikat (Styrofoam 250) valdes. Dessa skivor är 10 cm tjocka och har fasade kanter vilket underlättar utläggningen. Isoleringsskivorna byggdes över med ett 0,7 meter tjockt lager av Subb (god bärighet, billig och goda tjäleegenskaper).

Totalkostnaden för att anlägga detta tjälskydd med isoleringsskivor på I-J-dammen i fullskala uppskattas grovt kosta 6 400 000 SEK (bilaga 12). Detta motsvarar dubbla kostnaden för samtliga övriga konstruktioner men testsektionen väntas vara en bra jämförelse och värdemätare för övriga konstruktioner.



Figur 6.2 Skiss av isoleringsskivornas montering med överlappande kanter för att minska koldinträngning.

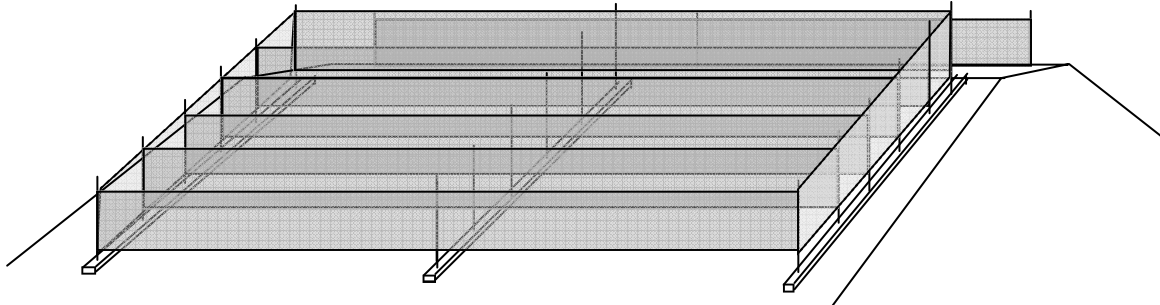
Den kanske största förevändningen mot att använda isoleringsskivor på en fyllnadsdamm är att de kan dölja sjunkhål som kan bildas på dammen till följd av inre erosion. Ett sätt att delvis komma runt problemet är att dela upp isoleringsskivorna i mindre delar, fortfarande med överlappande kanter. Detta förväntas dock sänka materialets isolerande förmåga avsevärt. De täta skivorna riskerar också att vara dåliga att användas under högsta dämmningsgränsen på slänten. Eftersom vattentransport endast sker mellan skivorna riskeras annars materialtransport i anläggningsytan mellan skivor och underliggande material (här subb) och påverka konstruktionen.

6.1.4 Konstruktion 4: Snöfångare

Den fjärde testsektionen (bilaga 11) konstruerades för att fånga upp och hålla kvar snö på dammens uppströmsslänt och krön. Orsaken till detta är snöns goda egenskaper som tjälskydd.

Snöfångaren består sju stycken 2 meter höga finmaskiga nät uppspända med stålstolpar var tionde meter. Stolparna är 3 meter långa, nedgrävda 70 cm i marken och uppspända med 2

vajrar från varje stolpes topp till lämpligt placerade stenblock. Snönäten är tänkt att bromsa upp vinden så att snö fångas upp och hålls kvar. Det är konstruerat av slitstarkt polyetylen med 5 cm maska, som förväntas stå emot stark vind och extrema temperaturer. Snönäten är riktade vinkelrätt mot dominerande vindriktning, och står parallellt med dammkrönet.



Figur 6.3 Snöfångare med snönät som tjälskyddande konstruktion ovanpå på testsektion 4. Snönätet hålls uppe mot vindpåverkan med stålstolpar var 10:e meter, som är fästa med vajrar i stenblock.

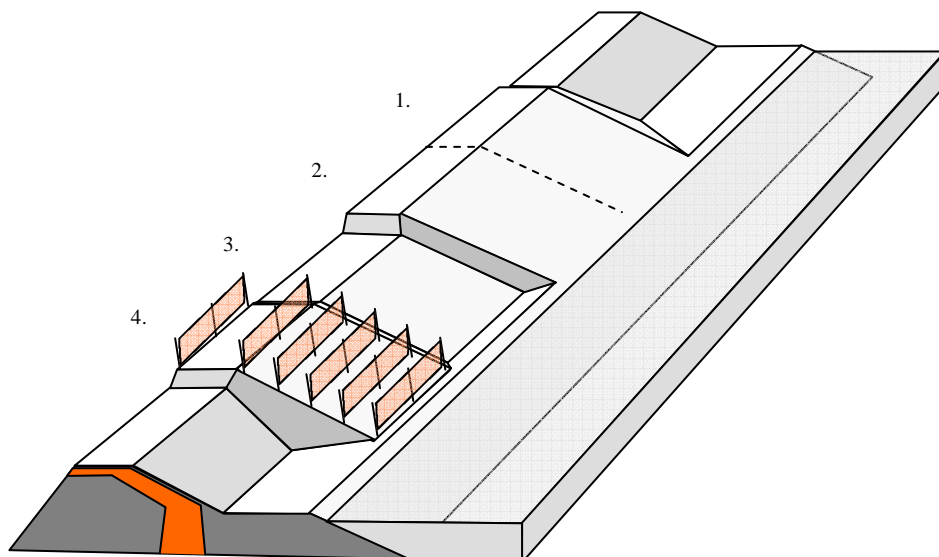
Under snöfångaren på uppströms slänt ligger ett korrekt dimensionerat erosionsskydd av sprängsten enligt Sweco VBB:s rekommendationer (1,9 meter tjockt). På krönet har en begränsad överbyggnation gjorts av 1,1 meter tjock A-sand under 0,5 meter Subb (se motivering av krönet på konstruktion 4) för att skydda tatkärnan från köldnedträngning innan den första snön kommer på hösten.

Det bör kunna bli billigt att konstruera ett tjälskydd med snöfångare i fullskala. Den provisoriska och väl dimensionerade snöfångaren som är uppförd på testsektion 4 uppskattas grovt kosta 3 100 000 SEK (bilaga 12) vid fullskalebyggnation. Denna konstruktion kräver mycket handarbete till skillnad mot övriga lösningar. En smart design kan begränsa arbets- och materialkostnaderna avsevärt, och möjliggöra enkel förflyttning vid behov.

6.2 UPPFÖRANDET AV KONSTRUKTIONER OCH MÄTUTRUSTNING

Utformningen av konstruktionerna presenteras i bilaga 11. Konstruktion 1 och 2 baseras helt och hållet på material som finns i dammens närområde (A-sand, Subb, 0-50 mm, 5-50 mm och sprängsten). I konstruktion 3 används isoleringsskivor av cellplast tillsammans med lokala material. Konstruktion 4 består av lokala material överbyggda av nät som är tänkt att fånga upp drevsnö.

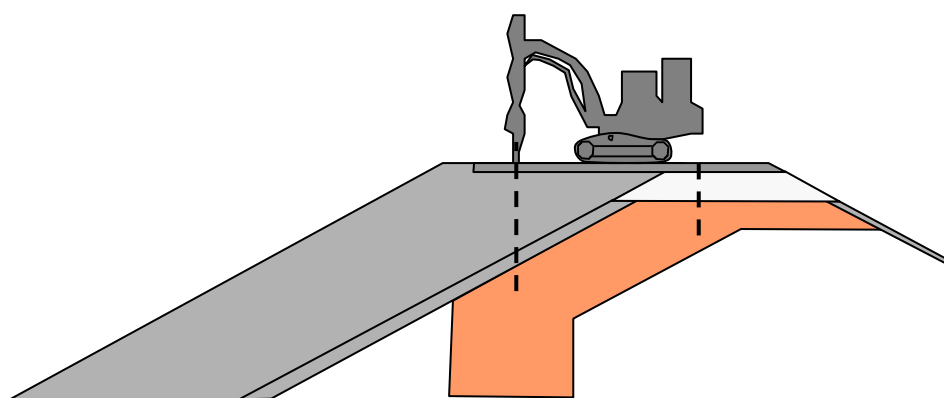
Själva byggandet av konstruktionerna utfördes av Peab i Aitik med hjälp av oss själva. Arbetet utfördes under två veckor kring månadsskiftet augusti/september, innan kylan kommit som kunde orsaka en störning av experimentet. Vid anläggningen användes ett tiotal lastbilar/dumprar, en grävmaskin och två hjullastare.



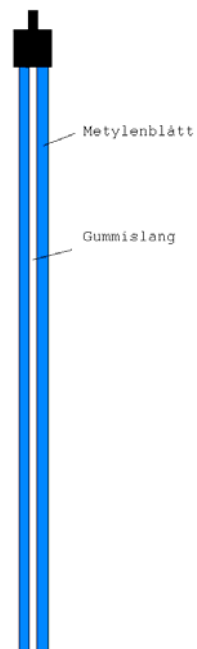
Figur 6.4 Placeringen av testsektionerna med tjälskydd på I-J-dammen. Sektion nr 1 ligger längst mot nord-väst. Täckärnans position har markerats i dammens genomskärning

För att kunna följa upp och utvärdera resultatet av de byggda tjälskydden måste tjälnedträngningen i varje sektion kontrolleras efter vintern. Detta görs med så kallade Gandahlmätare (figur 6.6). Detta är ett instrument för mätning av tjäldjup utvecklat av Gandahl 1957. Mätaren borrar ned i marken och får stå över vintern eller önskad period.

Instrumentet består av ett i detta fall tre meter långt plaströr, ca 20 mm i diameter. Inuti detta är det fäst en gummislang med ungefär halva diametern. Mellan slangen och röret fyller man på med en vätska bestående av utspädd metylenblått. Denna vätska ändrar färg från blå till genomskinlig när den utsätts för frysning. När vätskan fryser expanderar den och då komprimeras den luftfyllda gummislangen och hindrar plaströret från att spricka. För att läsa av aktuellt tjäldjup lyfter man upp röret och ser var gränsen för färgskiftning går.



Figur 6.5 Nedborrning av tjälgränsmätare



Figur 6.6 Gandahlmätare

Vi valde att borra ned nio mätare, en på varje krönsektion och en på varje släntsektion (figur 3.7). Den sista borras ned i den ursprungliga dammen som referens. Detta beror dels på att tidigare mätningar visar på olika tjäldjup på slänt och krön, dels på att tjälskyddet ser olika ut på alla dessa ställen. Borrningsmomentet är ganska känsligt då det är ett ingrepp i tätkärnan och ska utföras av kvalificerat yrkesfolk. Mätarna kommer att få sitta under vintern och sedan avläsas med jämna mellanrum när den beräknat största tjälnedträngningen äger rum, runt mars-april. Detta arbete ligger utanför vårt examensarbete och kommer att utföras av Sweco VBB.

Tjälskydden på krönen är huvudsakligen byggda för att minimera köldinträngning ner i den prioriterade tätkärnan i slänten, men mätningen av tjäldjupen i krönen bör kunna ge information om vilket av några testade kombinationer av material som fungerar bäst som tjälskydd. På slänterna, där tjäldjupet är mest intressant, ska effekten av tjälskydden även studeras för att kunna dimensionera ett bra skydd för hela dammen.

För att öka jämförbarheten placeras samtliga Gandahlmätare på samma plats i de olika sektionerna (4 respektive 11 meter från den ursprungliga krönkanten på nedströmssidan). Samtliga tjälgränsmätare placeras med mitten av röret på sektionens förväntade tjäldjup. För vissa sektioner innebär detta att mätarens övre del ligger djupt under ytan.

Gandahlmätarna sänktes ned i foderrör (50 mm) som borrades ned med en borrhvagn (Klemm) av PG Geoteknik tillsammans med Fredrik Jonasson (Sweco VBB). Mellanrummet mellan foderröret (114 mm) och Gandahlmätarna fylldes sedan ut med filtersand. Placeringen av tjälgränsmätarna presenteras i bilaga 13.

6.3 UTVÄRDERING

Vilken sektion som är den bästa lösningen för Boliden beror på flera aspekter:

- Tjälskyddande förmåga
- Kostnad
- Miljö
- Byggnation

Den **Tjälskyddande förmågan** hos det dimensionerade tjälskyddet är förstås direkt avgörande. Här gäller det att skyddet hindrar tjälen från att tränga ned i tätkärnan. Enligt beräkningarna ska alla byggda sektioner fungera, men felkällor finns alltid (se kap. 5.3). Sedan kan det visa sig att vissa sektioner är överdimensionerade, och sådant måste också tas ställning till. Utvärderingen av tjälskydden sker under våren i samband med att tjälen mäts.

Kostnaden är givetvis också viktig. Om likvärdiga alternativ finns bör man välja det billigaste. För en detaljerad kostnads kalkyl för varje sektion hänvisar vi till bilaga 11. Här följer en sammanfattning:

Tabell 6.1 Uppskattade kostnader vid fullskalebyggnation av konstruktion 1 – 4.

Sektion	Kostnad
(Naturmaterial)	2 950 000 kr
(Naturmaterial)	3 100 000 kr
(Isoleringskivor)	6 400 000 kr
(Snöfångare)	3 100 000 kr

Det bör nämnas att priset på snöfångarna antagligen går att pressa en hel del. Dels genom att hitta en billigare lösning och dels genom att pressa materialkostnader vid köp av stora kvantiteter. Det senare gäller även för isoleringskivor.

Det totala priset på en sektion består av flera delkostnader. Vi har kostnader för *material* från kross samt för isoleringskivor och snöfångare. Krossfraktionerna skiljer sig även sinsemellan prismässigt. Det enda material som är gratis är A-sand. Utöver materialkostnader har vi kostnad för *transport* och *lastning* och *byggnad*. Avgörande för transportkostnad är hur långt bort materialet ligger. A-sanden är klart närmast och då blir ju kostnaden minst. Ett problem med A-sand är att det är ett så finkornigt material att filter krävs för att hålla det på plats. Då tillkommer kostnader för att lägga ut tunna lager av filtermaterial, till exempel 0-50, både

över och under A-sanden. Det gråberg som användes för testsektionerna kommer inte att kunna användas ur miljösynpunkt. Istället ska miljögråberg användas och det ligger längre bort från dammen.

Miljön är en viktig faktor. Vissa restprodukter från gruvdriften kan ha negativ inverkan på miljön (se kap. 2.1.2). Material som används till byggnation måste vara godkända ur miljösynpunkt. På kort sikt innebär det en större kostnad för Boliden men på lång sikt brukar det visa sig vara en bra investering. För att avgöra vilka material som uppfyller miljökraven så måste varje material specialstuderas och analyseras. Representativa prover från gråbergsbrytningen skickas till labb. Utifrån detta klassas berget som användbart byggmaterial eller material att läggas på deponi. Sedan beror det också på vad som ska byggas. Vid dammbygge finns en överhängande risk för spridning av miljöfarliga ämnen genom läckvatten som rinner igenom dammkroppen och för med sig ämnen vidare i vattensystemen.

Sist men inte minst bör man utvärdera sektionerna ur ett byggnadsmässigt perspektiv. Hur lång tid finns det till att bygga sektionerna? Hur är det med platsutrymme? Finns det ledig personal och maskinpark? Vilka material finns tillgängliga i rätt kvantiteter? Alla dessa faktorer är svåra att förutsäga även om det går att planera i stora drag. Man kanske får vara beredd att improvisera lite grann.

7 SAMMANFATTANDE KOMMENTARER

Fyra testsektioner är uppförda på I-J-dammen med instrumentering för mätning av vintersäsongens tjälnedträngning. Uppdraget att följa upp tjältskyddens effektivitet och föreslå ett förslag till fullskalig tjältskydd ligger nu på SWECO. Vid detta arbete måste noggrannare hänsyn tas till erosionsskyddens tjältskyddande egenskaper och eventuella effekter på miljön.

Testsektion 1, 2 och 3 är speciella på flera sätt. I sektion 1 och 2 utnyttjas täta, finkorniga material med goda vattenhållande egenskaper som därigenom fodrar stor energiåtgång för att frysa igenom. Konventionella tjältskydd på dammar baseras ofta på luftporernas isolerande egenskap, och att begränsa istillväxten. Av denna anledning används grövre material (sand och dyl.). Testsektion 4 är enligt vår kännedom ensam i sitt slag. Aldrig tidigare har en konstruktion byggts på dammar i Sverige för att fånga snö som isoleringsskydd. Denna testsektion har en potential att bli mycket billig i fullskala.

Testsektion 3, med isoleringsskivor, beräknas bli den dyraste sektionen och är förknippad med viss skepsis kring lösningens dammsäkerhet. Denna har byggts för att jämföra en vanligt förekommande tjältskyddande konstruktion mot de tre andra testsektionerna.

Idag är många dammar underdimensionerade med avseende på tjältskydd av tät kärnan. Detta gäller inte minst de dammar som har en ytlig, lutande tät kärna längs med uppströmsslänten. Denna arbetsmetodik, att bestämma lämpliga tjältskyddande material med COUP-modellen och köldlaboration, bedöms vara mycket noggrann. Utifrån de grundinställningar som genomförts i modellen kan sannolikt enklare justeringar genomföras om andra dammar, med liknande konstruktioner, ska simuleras överbyggda av dess lokala material.

8 REFERENSER

8.1 PUBLIKATIONER

Aronsson, P. och Björk, M. (2004). *Stabilitet hos en homogen gruvdamms nedströmslänt*, Universitetsservice US AB, Stockholm (ISSN 1651-064X)

Arya, L., Leij, F., Shouse, P. och van Cenuchten M. (1999). *Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle size distribution data*. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:510-519

Arya, L., Leij, F., Shouse, P. och van Cenuchten, M. (1999). *Relationship between the Hydraulic conductivity function and the particle size distribution*. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:1063-1070

Arya, L. och Paris, J. (1981) *A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data*. Soil Science. Soc. Am. J 45:1023-1030

Eckersten, H., Gärdenäs, A. och Lewan, E. (2003) (*Biogeofysik, en introduktion*. Swedish University of Agricultural Sciences, Departement of Soil Sciences, Divison of Environmental Physics. Emergo 2003:5 ISBN 91-576-6591-5 ISSN 1651-7210

Fondelius, S. (2006). *Användning av georadar som hjälpmedel vid prospektering av grus- och bergtäkter* Luleå Universitet ISSN 1404-5494

Fröberg, G. och Höglund, L-O. (2004). *MiMi Light – en populärvetenskaplig sammanfattning av MiMi-programmets forskning kring efterbehandling av gruvavfall*. MiMi Print, Luleå (ISSN 1403-9478, ISBN 91-89350-41-3

Hansson, J. (2002) *En enkel modell för beräkning av tjäldjup*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.. ISSN 1650-6553 Nr 22

Isaksson, N. och Lundström, H. (2005). *Dammsäkerhetsutvärdering samt utformning av dammregister och felrapportering för svenska gruvdammar*. Institutionen för geovetenskaper Uppsala Universitet. ISSN 1401-5765

Jansson, P-E. och Karlberg, L. (2001). *Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems*. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm

Jansson, P-E. (1996). *Markfysik – övningar och komplementlitteratur*. Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet

Jonsson, A. (2003). *Sulfidoxidation och metalltransport i gruvavfall – Fallstudie på planerad guldgruva i Svartliden*, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Uppsala (ISSN 1401-5765)

Knutsson, S. (1981) *Tjältningsprocessen-beräkning av tjäldjup*, AV 009, AS 017. Avdelningen för geoteknik, Tekniska Högskolan i Luleå

Miller, R. D. (1980) *Applications of soil physics: Freezing Phenomena in Soils*. Department of Agronomy, Cornell Univ, Ithaca, NY

RIDAS – Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet (2002). Svensk Energi AB. ISBN 91-7622-174-1

Smith, M. och Williams, P. (1989) *The Frozen Earth, Fundamentals of Geocryology*. Carleton University, Ottawa. ISBN 0 521 42423 4

Sellers, W. D. (1965), *Physical Climatology*, Library of Congress Catalog Card Number: 65-24983

The University of Chicago Press, Chicago 60637

The University of Chicago Press, Ltd., London ISBN 0-226-74699-2

van Genuchten, M., Leij, F.J. och Yates, S.R. (1991) *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, version 1.0*. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

Vattenfall publikation, (1988) *Jord- och stenfyllningsdammar* , ISBN 91-7186-271-4

8.2 INTERNET

[http://www.boliden.se/www/BolidenSE.nsf/\(LookupWebAttachment\)/Faktablad/\\$file/AITIK_sv_07_webb.pdf](http://www.boliden.se/www/BolidenSE.nsf/(LookupWebAttachment)/Faktablad/$file/AITIK_sv_07_webb.pdf), 2007-06-02

<http://www.georadar.com/howitwrk.htm>, 2007-08-10

<http://www.georadar.se/dokument.htm>, 2007-09-06

<http://www.smhi.se/cmp/jsp/polopoly.jsp?d=7638&a=21743&l=sv>, 2006-05-30

<http://www.swedgeo.se/publikationer/Info/pdf/SGI-I16.pdf>, 2007-08-03

8.3 INTERVJUER

Takala, I. och Sjöblom, Å, (2007-10-22). Miljöavdelningen Aitik.

Bilaga 1 Siktkurvor

A-sand 0-2 mm

Väglaboratoriet
i Norr AB



Sida 1 (1)

RAPPORT
utfärdad av ackrediterat laboratorium

REGISTRERINGSNUMMER: 002 1918 A

INKOM: 02-12-04

OBJEKT: ULF STENMAN

PROVTAGNINGSPLATS: PP1A

BESTÄLLARE: LULEÅ TEKN. UNIV.
GEOTEKNIK
971 87 LULEÅ

PROVTAGNINGSDATUM:

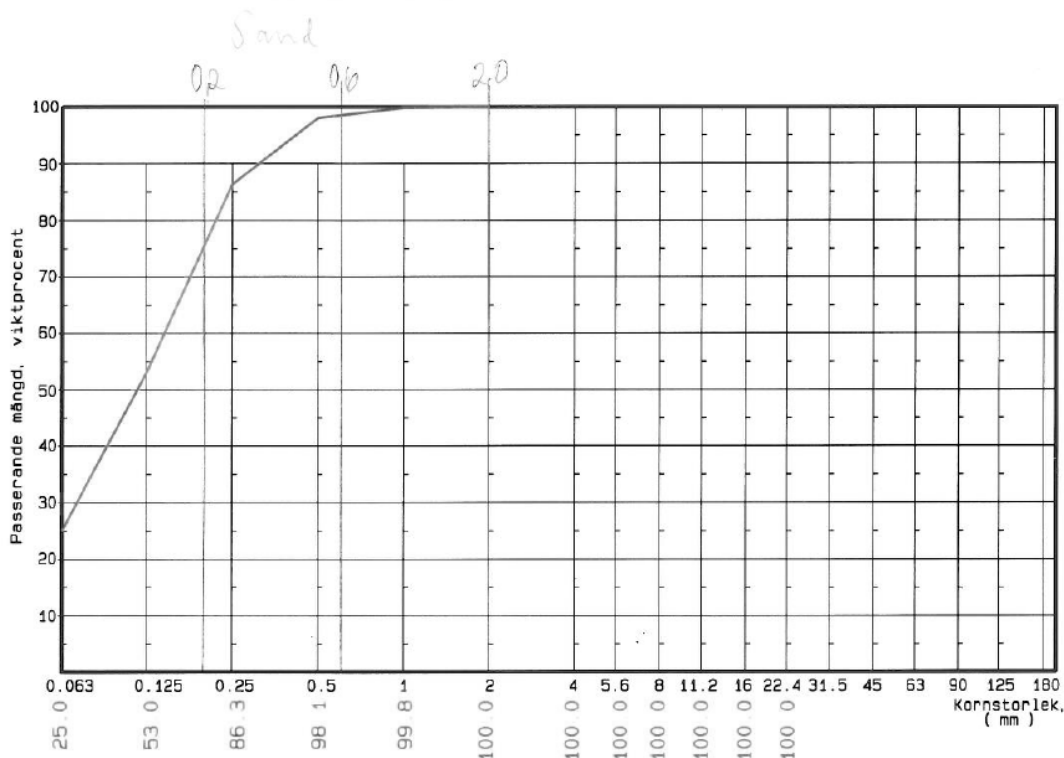
MATERIALTYP: JORDPROV

MÄRKNING:

ENTREPRENÖR:

LEVERANTÖR:

FINKORNHALT 0.063-max: 25.0%
Metod VVMB 619:1998 (trådsikt)



- * Provningsresultatet avser endast till Väglaboratoriet inkommet prov.
- * Denna rapport får endast återges i sin helhet om inte Väglaboratoriet i förväg skriftligen godkänt annat.
- * Laboratorier ackrediteras av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt svensk lag.
- * Den ackrediterade verksamheten vid laboratorierna uppfyller kraven i SS-EN ISO/IEC 17025:2000.
- * Nästosäkerhetsberäkning kan fås på begäran

Väglaboratoriet i Norr AB
Hedenbrovägen 16 C
951 36 BODEN
Tel. 0921-19600 Fax. 0921-19605
Boden 2002-12-10

Utfört av

Bert Lindström

Väglaboratoriet

i Norr AB



RAPPORT
utfärdad av ackrediterat laboratorium

REGISTRERINGSNUMMER: 002 1931 A

INKOM: 02-12-04

OBJEKT: ULF STENMAN

PROVTAGNINGSPLOTS: PP3A

BESTÄLLARE: LULEÅ TEKN. UNIV.
GEOTEKNIK
971 87 LULEÅ

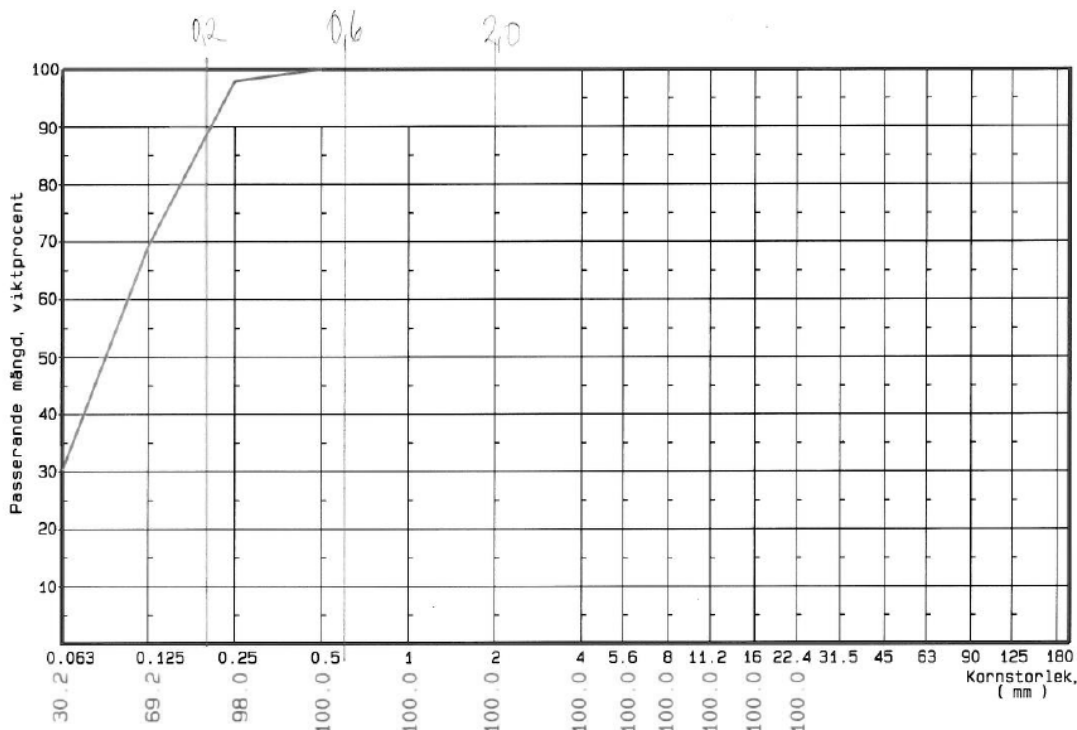
PROVTAGNINGSDATUM:

MATERIALTYP: JORDPROV

MÄRKNING:

ENTREPRENÖR:

LEVERANTÖR:

FINKORNHALT 0.063-max: 30.2%
Metod VVMB 619: 1998 (trådsikt)

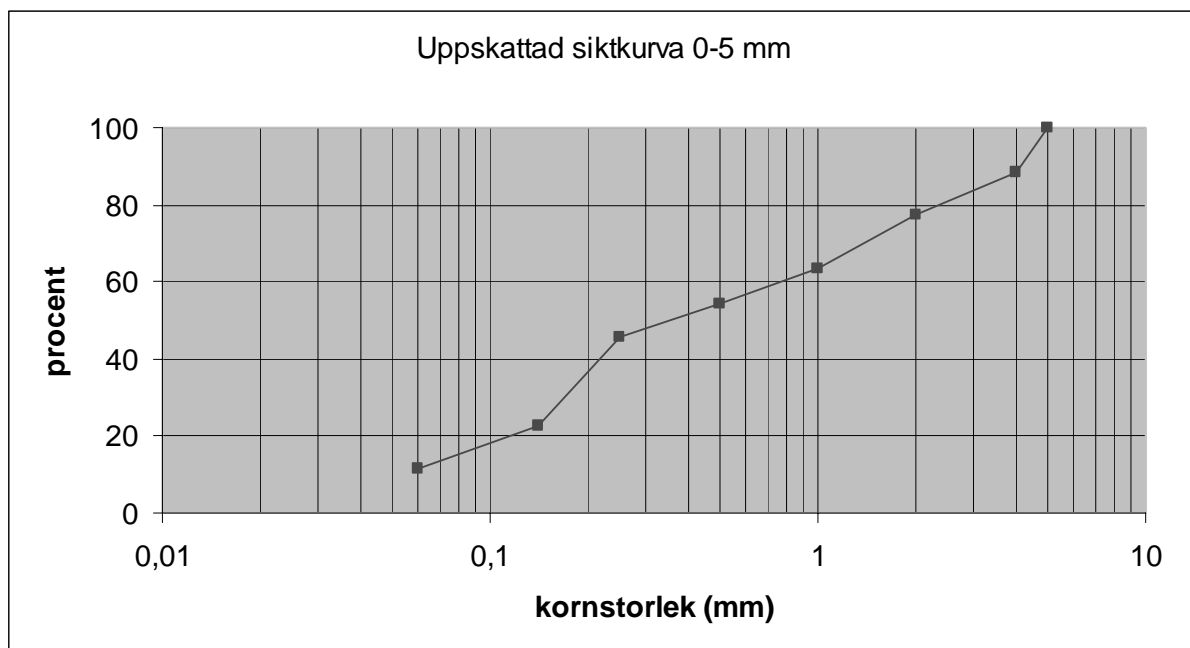
- * Provningsresultatet avser endast till Väglaboratoriet inkommet prov.
- * Denna rapport får endast återges i sin helhet om inte Väglaboratoriet i förväg skriftligen godkänt annat.
- * Laboratorier ackrediteras av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt svensk lag.
- * Den ackrediterade verksamheten vid laboratorierna uppfyller kraven i SS-EN ISO/IEC 17025:2000.
- * Mätosäkerhetsberäkning kan fås på begäran

Väglaboratoriet i Norr AB
Hedenbrovägen 16 C
961 36 BODEN
Tel. 0921-19600 Fax. 0921-19605
Boden 2002-12-10

Utfört av:


Bert Lindström

0-5 mm (grovt uppskattad)



Subb (sublimationsmaterial, 0-40 mm)



RAPPORT

Utfärdat av ackrediterat laboratorium
Report issued by an accredited laboratory

Provnnummer **60656**

PRODUKTIONSKONTROLL Stenmaterial

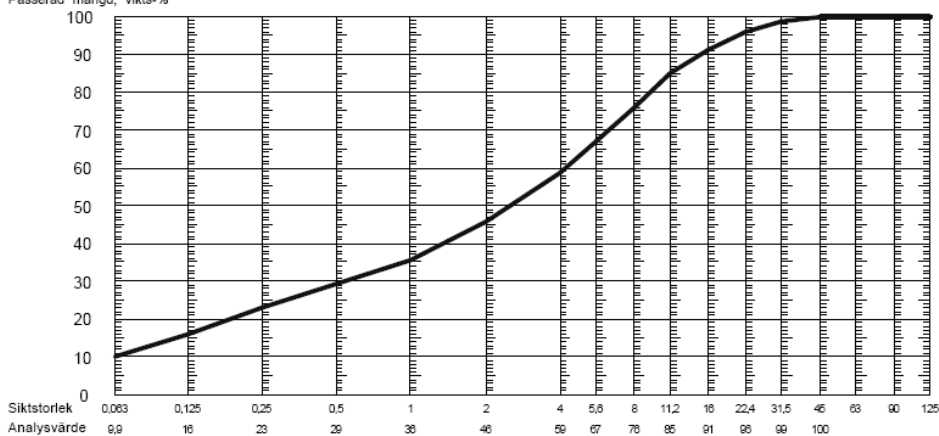
Sidan 1 av 1

Beställare NCC Roads AB, Sverige Nord	Provt datum 2006-06-22	Analys start 2006-06-26
Box 455 901 09 UMEÅ	Ankomstdatum 2006-06-22	Analys slut 2006-06-26
Produkt Samkross 0-40	Referensnr.	ID-nr. 13001800
Leverantör Aitik, bergtäkt och kross	Provtagningsplats	
Entreprenör Aitik	Provtagare Martin Lundkvist	
Objekt Aitik	Märkning Subb	

KÖRNSTORLEKSFÖRDELNING - SSEN 933-1

Gränslinje

Passerad mängd, vikts-%



Provresultat	Medel- värde	Fraktion (mm)	Notering
SSEN 933-1 Siktanalys EN933-1 Tvättning och siktning			Ort och datum UMEÅ 2006-06-26 <i>Lars-Åke Holmgren</i> Lars-Åke Holmgren, Labchef Underskriften är en elektronisk signatur

Provresultat avser endast till laboratoriet inkommet prov. Mätosäkerhet har delgivits kunden.
Kornstorleksfördelning: Laboratoriet använder stansade siktar >=4 mm.
(EA) = Ej ackrediterad metod. (E) = Enkelprov

Laboratoriet ackrediterat enligt SS-EN ISO/IEC 17025 samt miljöcertifierat enligt ISO 14001
Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

Sten / Asfalt - normal rapport

NCC Roads AB, Sverige Nord
Väglaboratoriet
Box 455
901 09 UMEÅ

Besöksadress
Förrådsvägen 16
Styrelsens säte
SOLNA

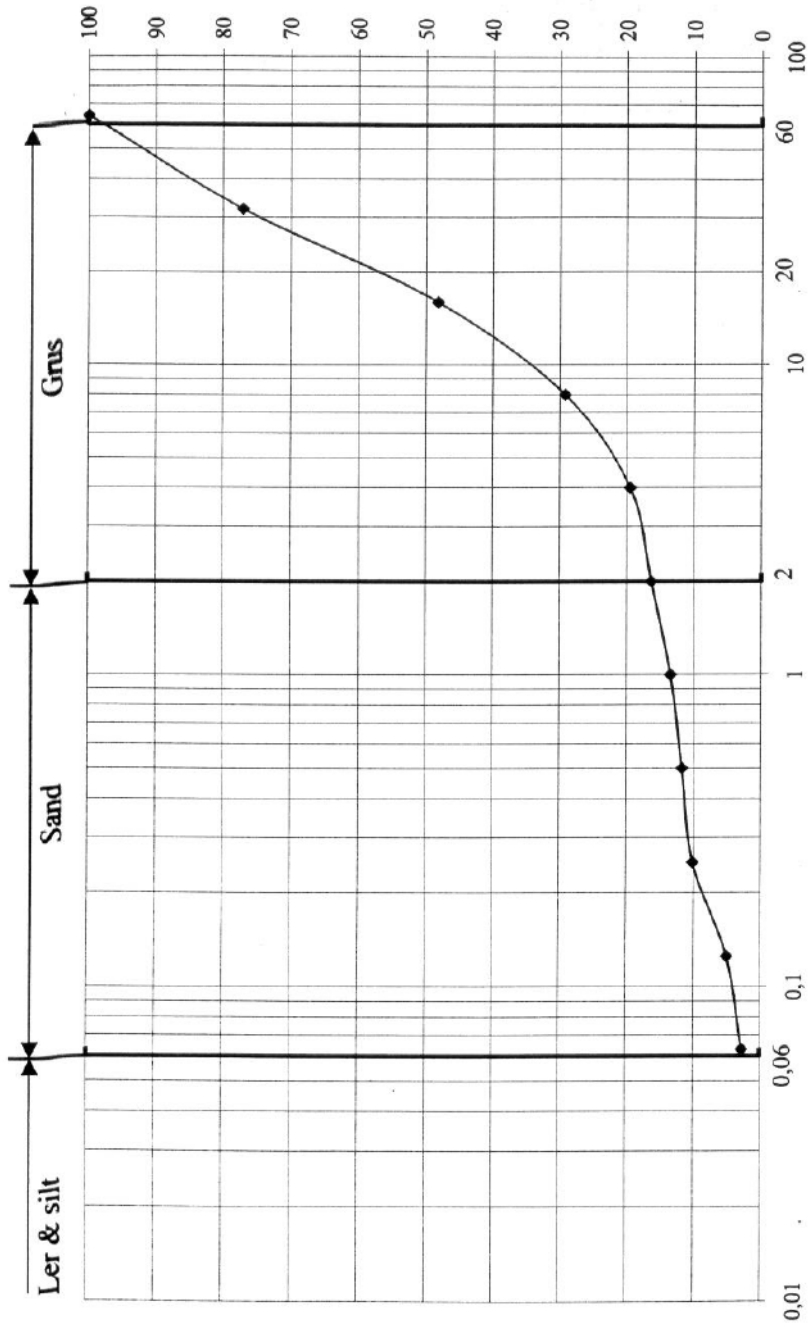
Telefon nr
090-16 81 92
Telefax nr
090-13 32 90

Org. nr
556302-3307
SE nr
SE5563023307 01

E-mail adress
umea.lab@ncc.se
Internetadress

0-50 mm

Höjning stödbankar E-F,
AITIK 2001



Provnummer	Provtagningsplats			Provtagningsdatum
4	X	Y	Z	1900-01-00
	täkt	0	0	

Provförteckning:

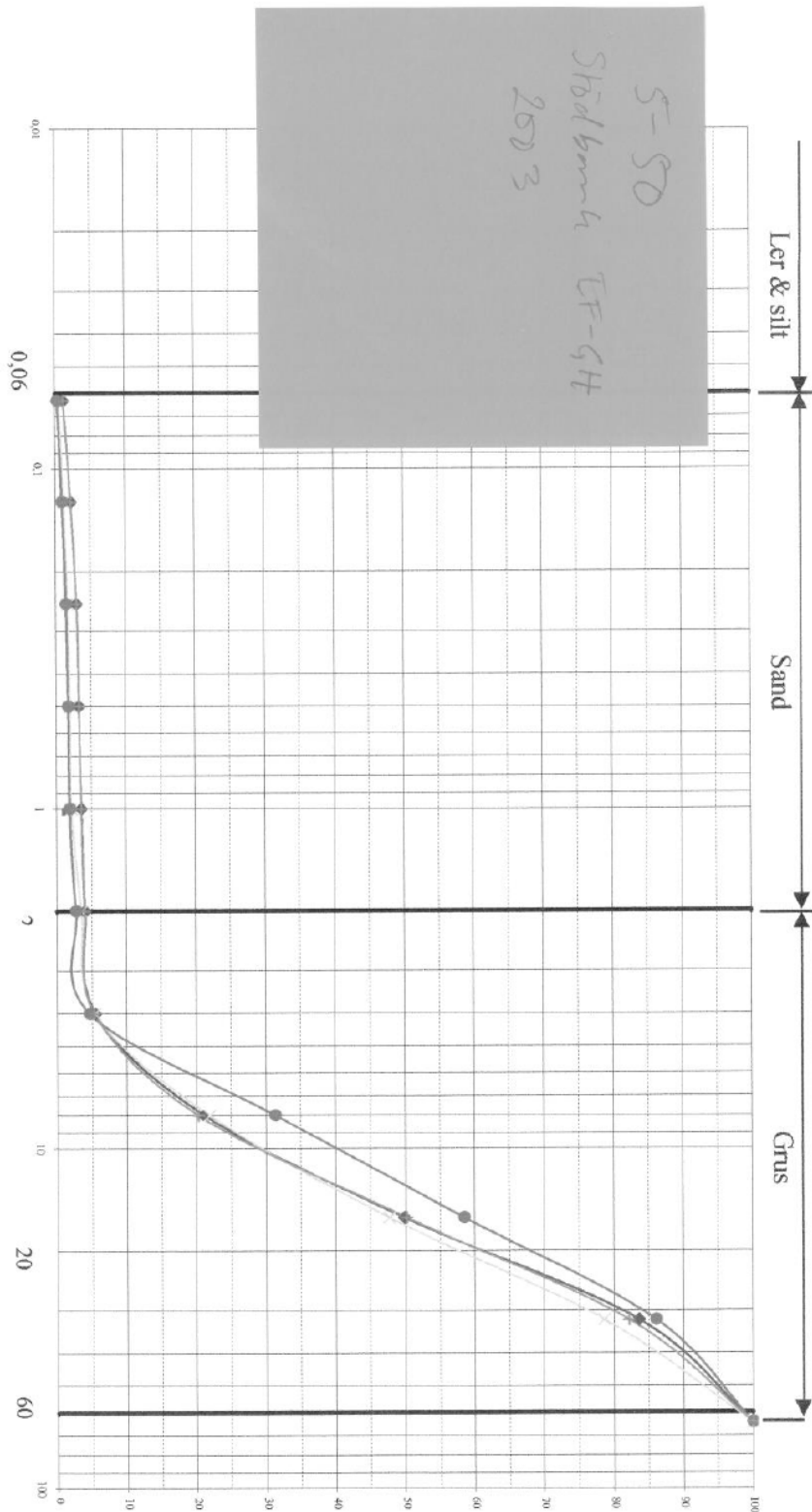
PEAB Nord AB

Kornfördelning

2001-08-01

5-50 mm (siktcurvan markerad med fyrkanter användes)

Höjning stödbank EF, GH.
 AITIK 2003



Provförteckning:

Provnnummer	Provförteckning
0	Sammanst Övergångslager

Provförteckning

Selidor/x

0

Pall/y

0

Djup/z

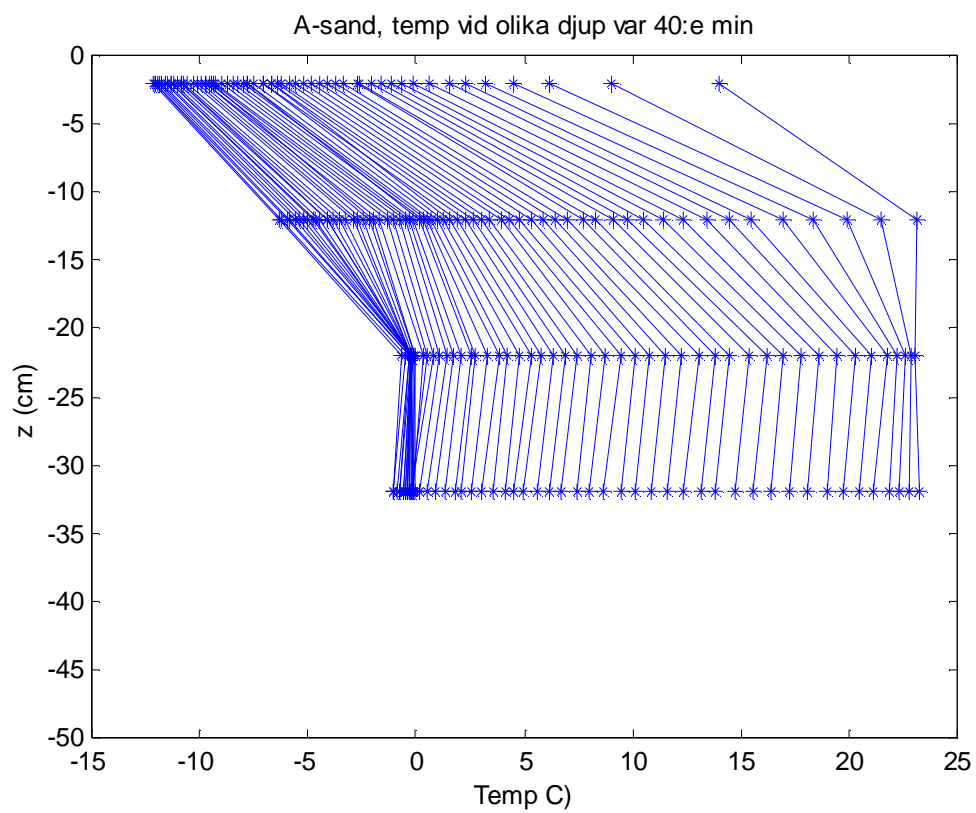
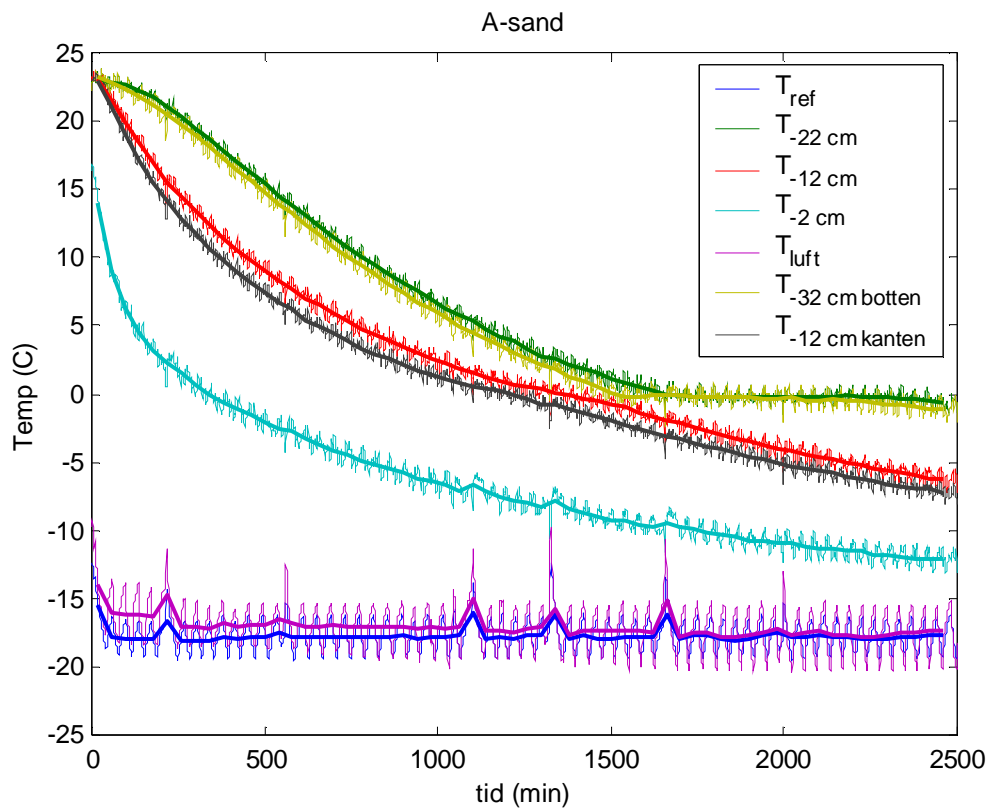
x

Provförteckning

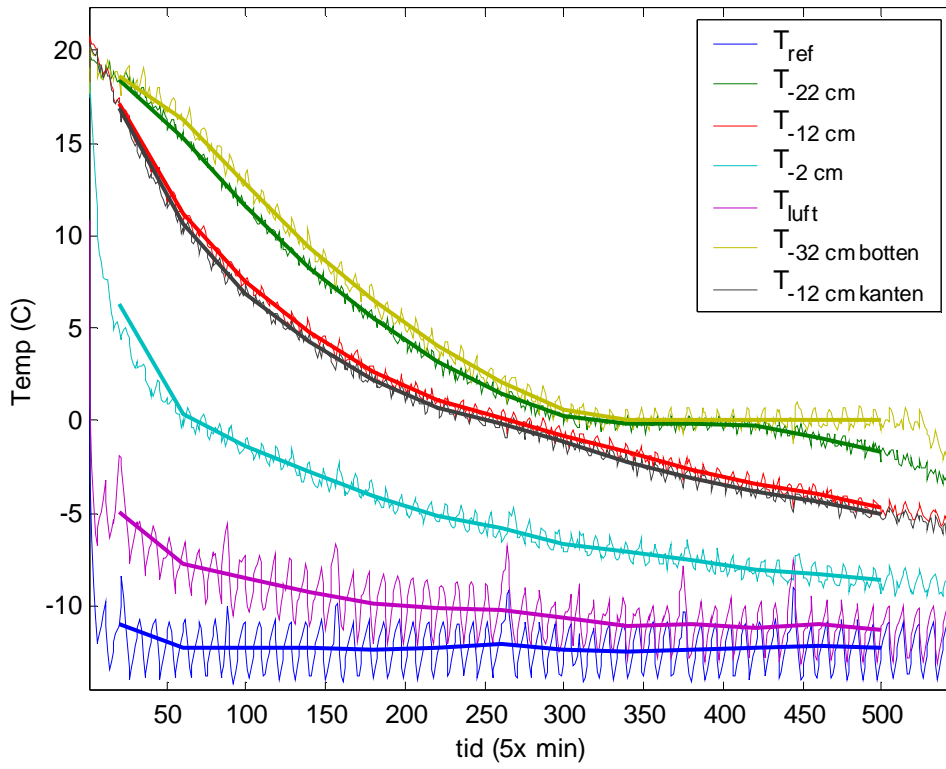
Peab Sverige AB

2004-02-15

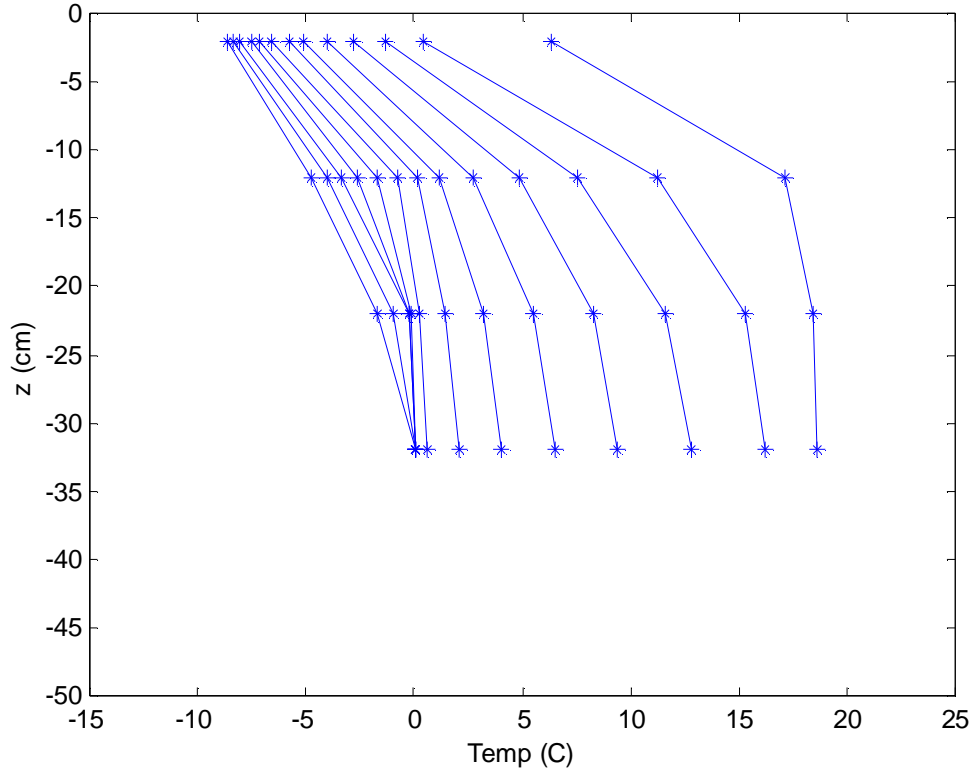
Bilaga 2 Resultat från köldlabb

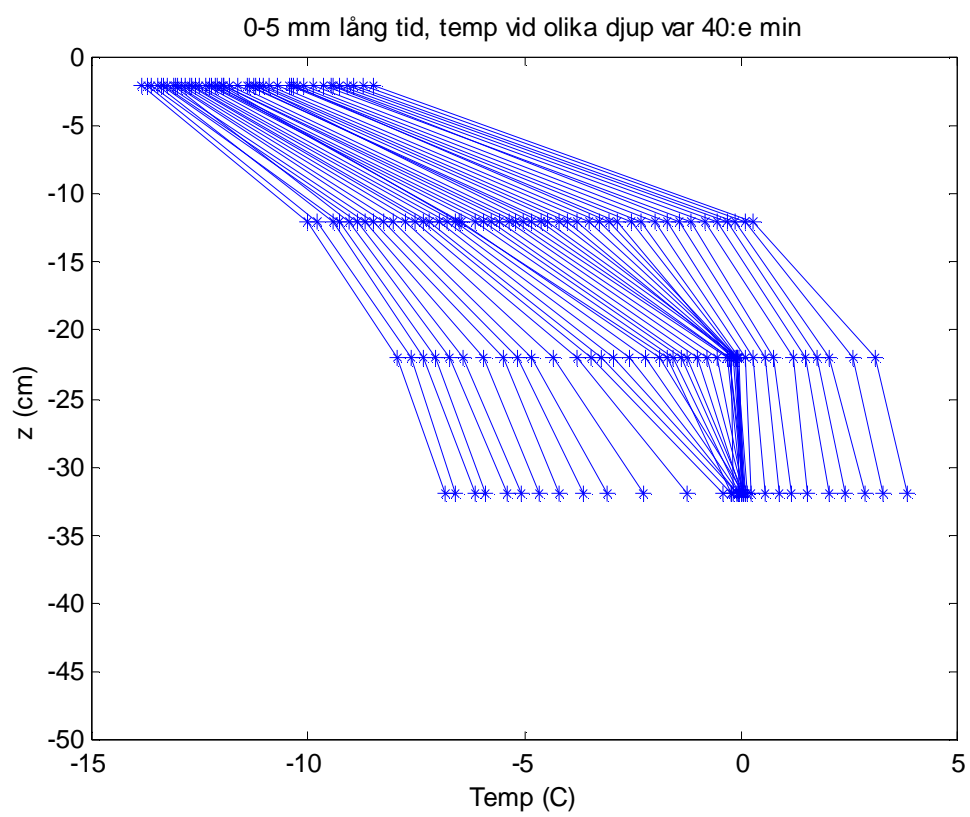
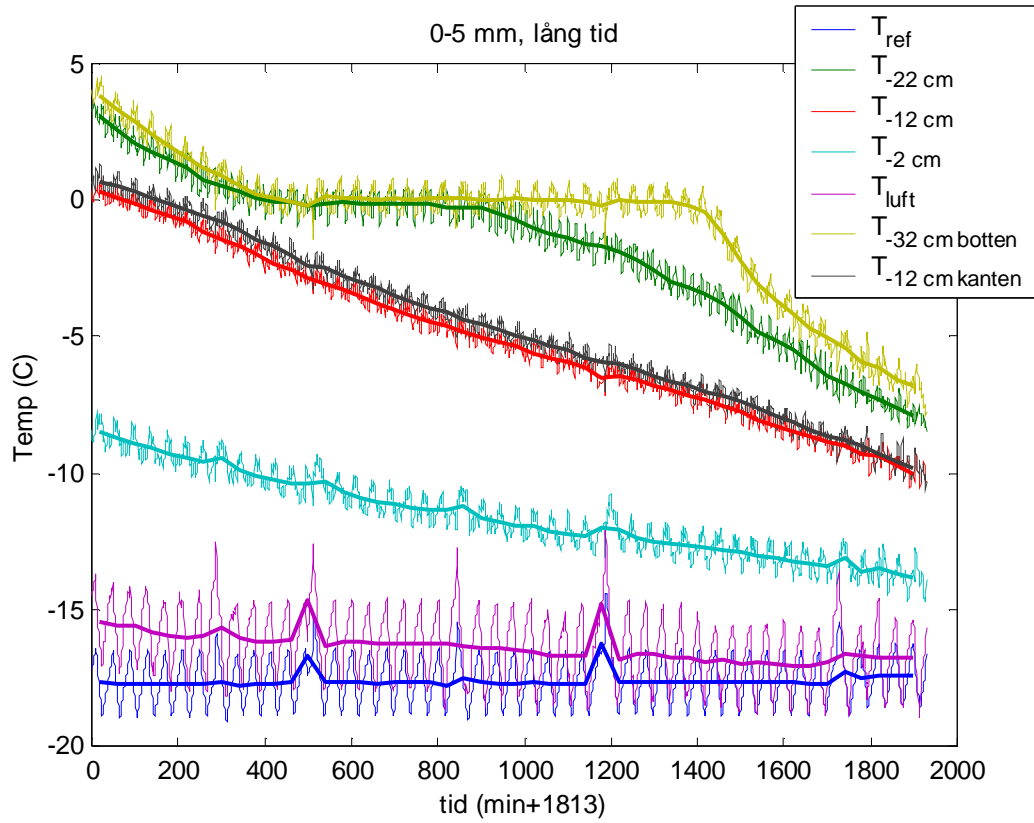


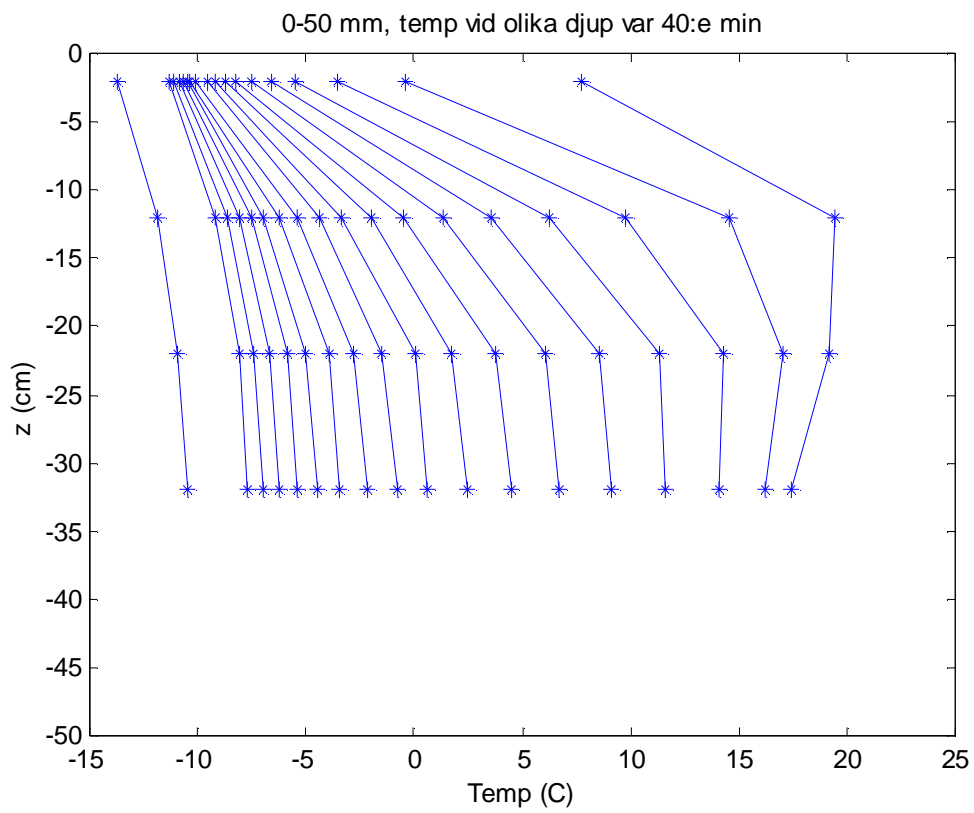
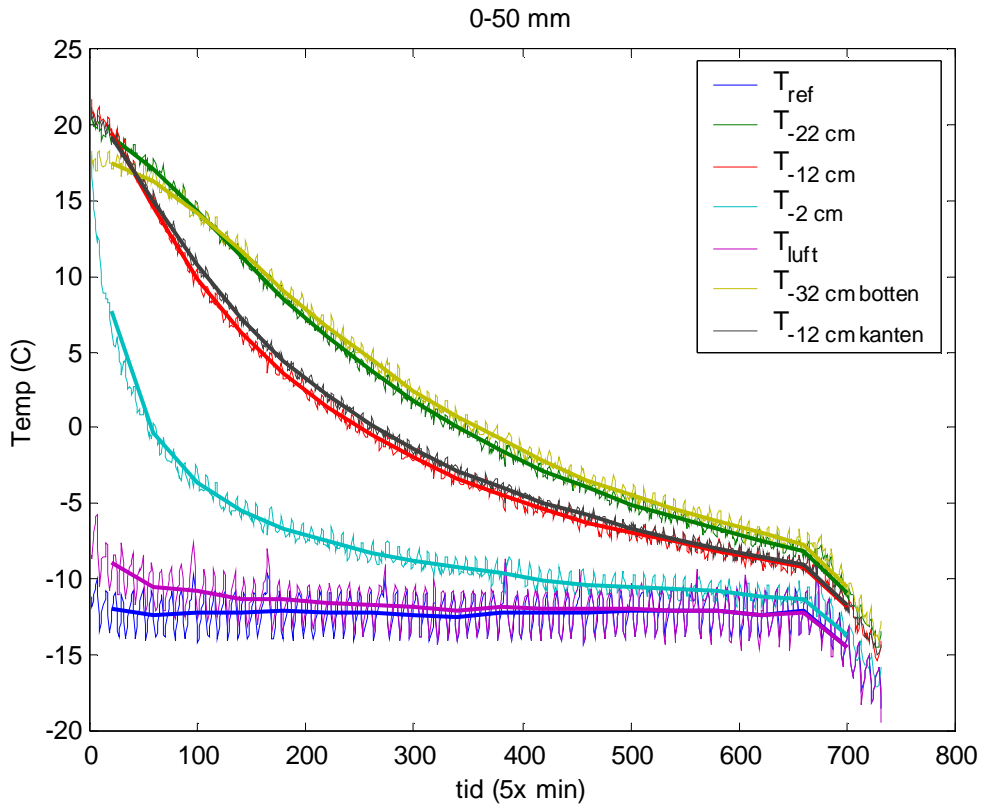
0-5 mm



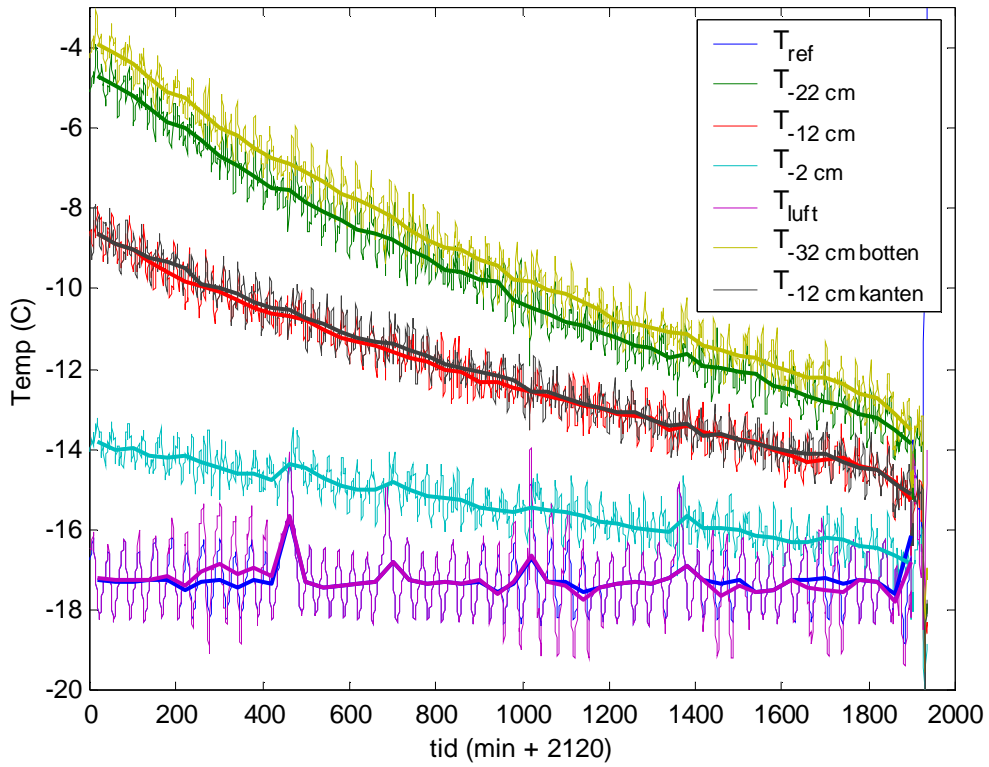
0-5 mm, temp vid olika djup var 200:e min



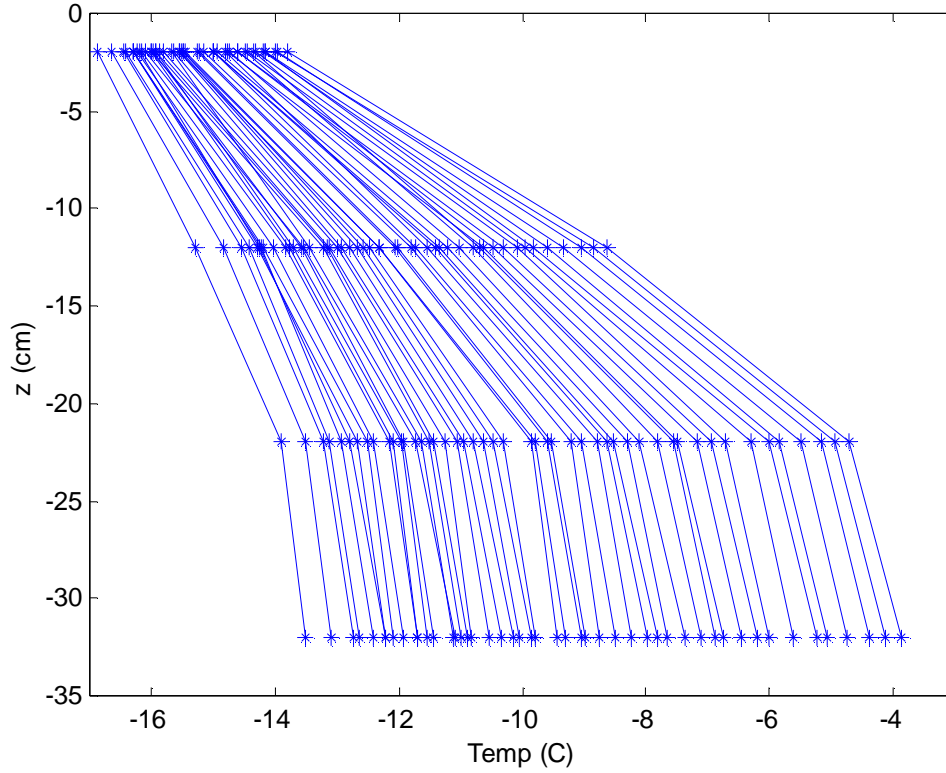


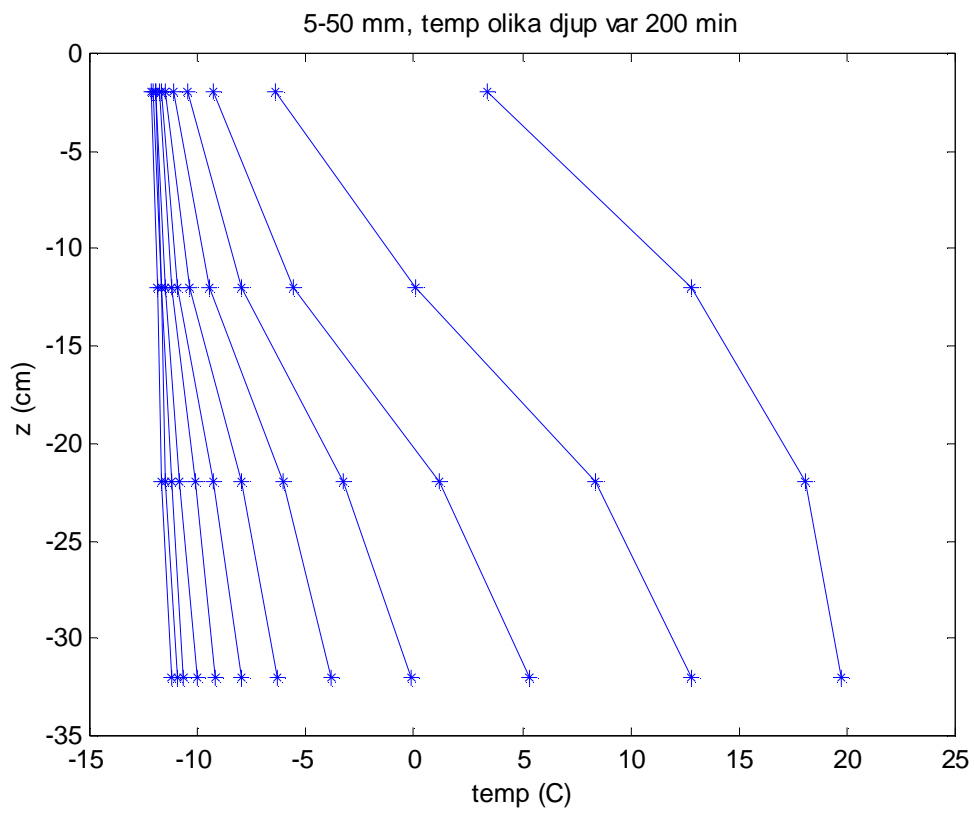
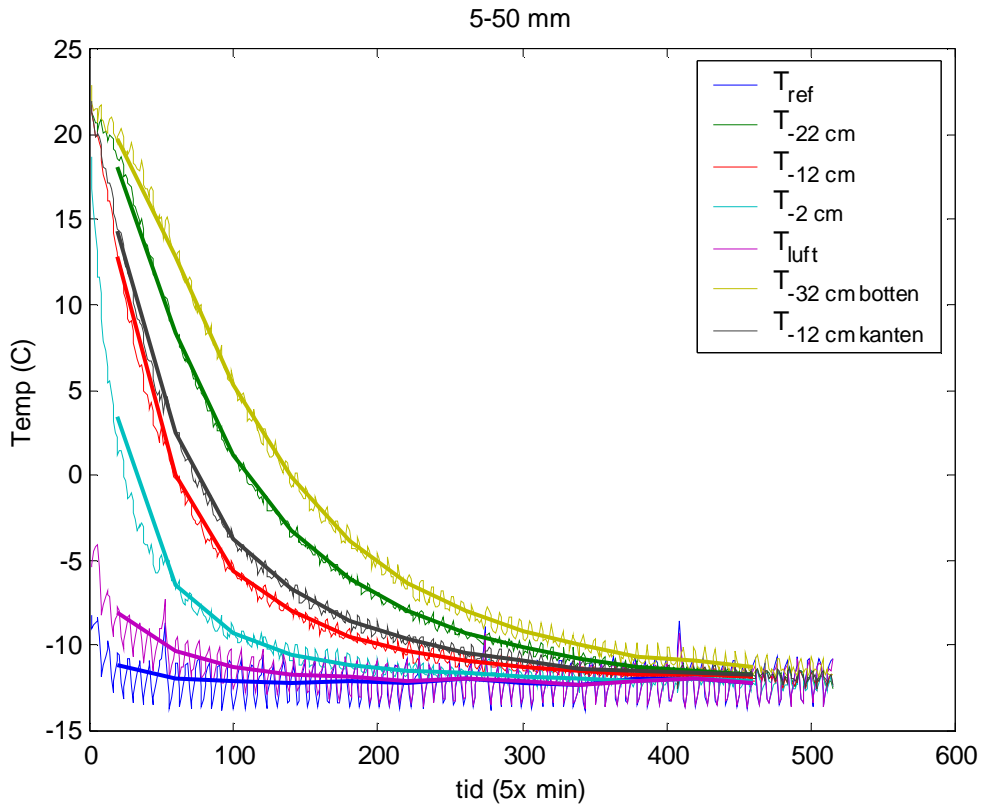


0-50 mm sen period, fruset prov



0-50 mm sen period, temp olika djup var 40 min





Bilaga 3 Exempeluträkning av värmeledningsförmåga

Exempeluträkning för materialet 0-5 mm, tinat prov:

dT/dz beräknas (se figur nedan) genom att medelvärdet beräknas av två utvalda temperaturkurvor vid ett visst djup (här 12 cm) i provcylindern.

Förändringen av energi i en kropp kan beräknas genom att ta dess värmekapacitet multiplicerat med förändringen av temperatur i kroppen, och dividera på dess djup. För att uppnå noggrannare resultat delas jordcylindern in i olika lager, vars individuella temperaturskillnader divideras på jordlagrens mäktighet, och slutligen summers ihop. En jords totala värmekapacitet (C) beräknas genom att väga samman värmekapaciteterna hos jordens beståndsdelar.

Värmekapacitet motsvarar den värmemängd som åtgår för att höja temperaturen på ett kilo av marken med en grad [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] (om multiplicerat med densiteten) eller [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$].

Värmekapaciteten varierar vid frysning, men mycket mindre än värmeledningsförmågan. Då ett material har flera beståndsdelar, som en jordart oftast har, används ett viktat värde på värmekapaciteten. Värmekapaciteterna för olika material hämtas ur tabell 2.1.

Vatten har den högsta värmekapaciteten beroende på dess speciella molekylstruktur, medan luftens värmekapacitet är så låg att den i praktiken kan försummas vid beräkning av en jords totala värmekapacitet.

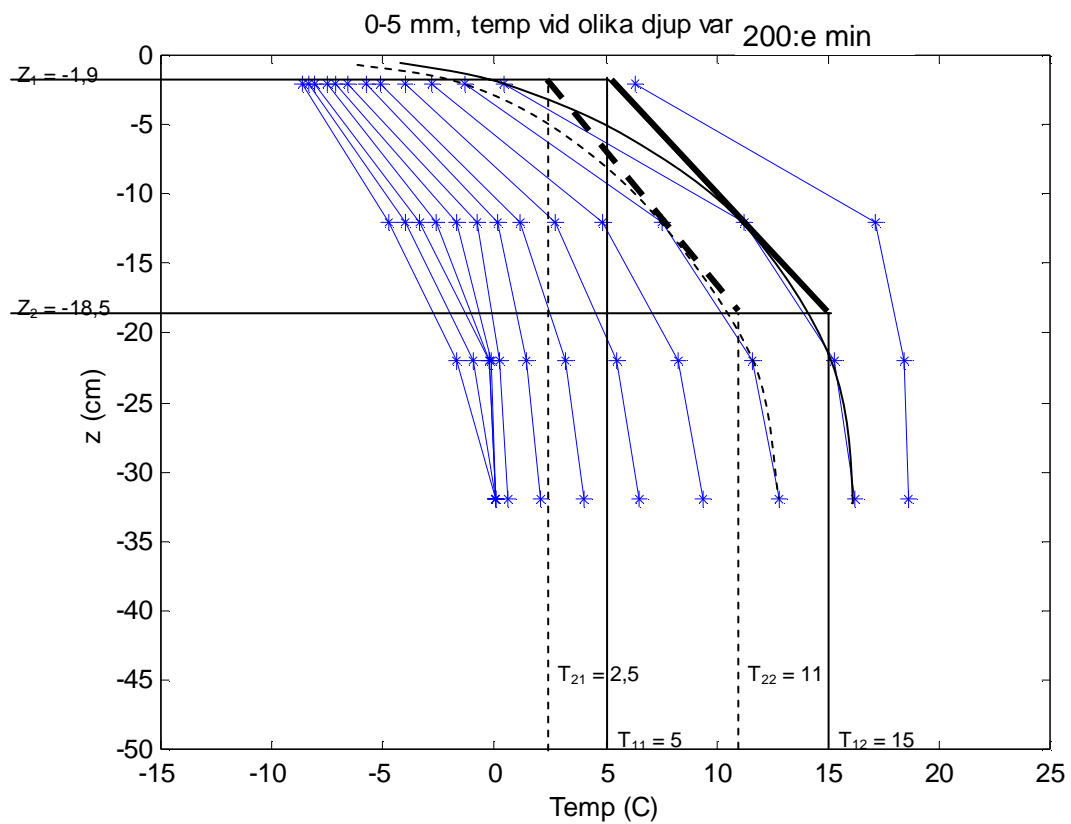
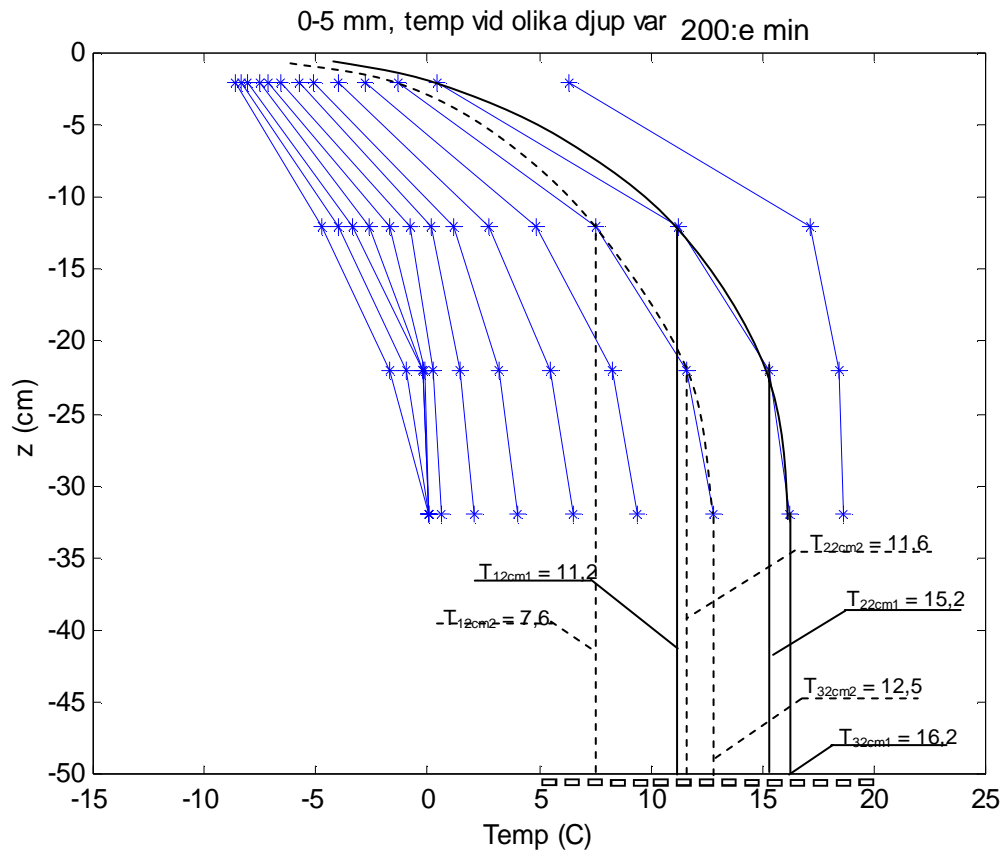
$$\begin{aligned} dT/dz &= \frac{1}{2} ((T_{11}-T_{12})/(z_1-z_2) + (T_{21}-T_{22})/(z_1-z_2)) = (1/2)*((5-15)/(-1,9- -18,5) + \\ &+ (2,5-11)/(-1,9- -18,5)) = - 55,7 [^{\circ}\text{Cm}^{-1}] \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_{0-5\text{mm tinad}} = 0,70*2,0*10^6 + 0,091849*4,2*10^6 = 1,77814*10^6 [\text{J m}^{-3}\text{^{\circ}C}^{-1}] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Sigma(\Delta T*\Delta z) &= \frac{1}{2}*((\Delta T_{12\text{cm}}+\Delta T_{22\text{cm}})*(z_{22\text{cm}}-z_{12\text{cm}}) + (\Delta T_{22\text{cm}}+\Delta T_{32\text{cm}})*(z_{32\text{cm}}-z_{22\text{cm}})) = \\ &= \frac{1}{2} * (((11,2-7,6)+(15,2-11,6))*(0,10) + \\ &+ ((15,2-11,6)+(16,2-15,2))*(0,10)) = 1,18 [^{\circ}\text{C m}] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta t = 200 \text{ min} = 12000 \text{ sek} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{0-5\text{mm tinad}} &= -G/(dT/dz) = - (\Delta E/\Delta t) / (dT/dz) = -(C* \Sigma(\Delta T*\Delta z))/\Delta t) / (dT/dz) = \\ &= -((1,778*10^6 * 1,18)/12000)/-55,722892 = 3,138 [\text{J sek}^{-1} \text{^{\circ}C}^{-1} \text{ m}^{-1}] \end{aligned} \quad (13)$$



Bilaga 4 Täckärna och stödfyllning

För att skapa en grundmall som kan representera de förhållanden som råder i I-J-dammen i Aitik började vi med att återskapa dammens nuvarande huvudkonstruktion, med en stödfyllning av morän och en tätkärna av tätpackad morän. I COUP-modellen finns en databas som beskriver hundratals olika jordar. Bland dessa valdes en typisk moränjord ut (Swedish till, 400:1). Eftersom dammen nästan helt saknar organiskt material valdes ett tvärsnitt ur moränjordens djupare skikt, där den organiska halten är försumbar, att få representera de förhållanden som råder i fyllnadsdammen. Täckärnans mer kompakta struktur simulerades genom att två justeringar gjordes på samma moränjord ur databasen. Dels ändrades värdet för modellens parameter Saturation från 33 volymprocent till 20. Saturation beskriver materialets maximala vatteninnehåll och är därför även ett mått på porositet. Normalt beror detta mest på materialets blandningsförhållande, där blandade fraktioner med fin och grov jord ger mindre porer än jordar med mer homogen kornstorlek. Vidare ändrades även den hydrauliska ledningsförmågan (Matrix Conductivity och Total Conductivity) från 34 mm/dygn till 20. Båda dessa justeringar beror på den packning som tätjorden utsatts för vid anläggningen av dammen. Moränjordarnas övriga koefficienter till Brooks-Coreys ekvation ges i tabell 6.1 i bilaga 4. Vid simuleringarna togs ingen hänsyn till dammslänternas sluttande sidor, utan alla simuleringar har genomförts med en modellprofil med horisontell långsträckt markyta. Täckärnan, som är tjockare mot uppströms slänt (2,5 m) än den är på nedströmssidan av krönet (1 m), sattes mitt emellan till 1,5 m för att på så sätt representera båda fallen. Stödfyllningens mäktighet är i praktiken simulerad som oändligt djup, eftersom modellen räknar med det understa lagret när inget annat finns angivet. Egentligen är stödfyllningen endast angiven som 0,1 meter.

Eftersom vi inte hade god kännedom om egenskaperna hos dammens inbyggda filter- och övergångslager valde vi att bortse från dessa lagrets påverkan av tjälningsförloppen vid simuleringarna.

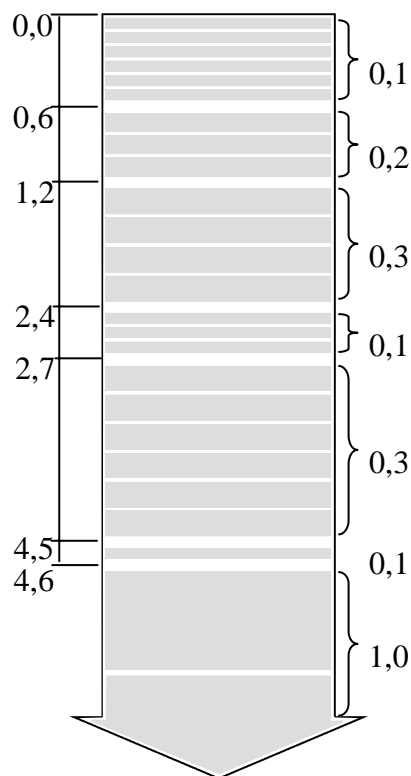
Dammens dränering: Modellens dräneringsdjup bestämdes att överensstämma med grundvattennivån i dammen (*Physical drain equation* → on, och *Empirical drain equation* → off, dammens dränering styrs med manuella inställningar). Både dräneringsnivå och minimal dräneringsnivå ändrades från -1 m till -15 m, som motsvarar dammens krönhöjd (*Drain level* → -15, *Drain level min* → -15). Avståndet till dräneringen ändrades till 60 meter vilket motsvara dubbla avståndet från mitten av krönet till dräneringen vid släntfoten (*Drain spacing* → 60 m).

Vegetationens interception stängdes av eftersom det knappt inte finns någon växtlighet på dammen (*Interception* → off). Energibalanskvationen används till att hela tiden beräkna

yttemperaturen och jordens evaporation (*Soil evaporation/Evaporation Method* → Iterative Energy Balance, *SurfaceTemperature* → f(E-balance Solution)).

Jordlager: Markprofilen byggs upp av olika horisonter som vart och ett kan manipuleras att få olika egenskaper (kornstorleksfördelningar, vattenhållande förmågor etc.).

Modellen ställdes in att ha täta och tunna beräkningslager (Parameter Tables/Soil Profile/layers) så långt ner i profilen som tjäldjupen förväntades sträcka sig, vilket gav en bättre upplösning för de mest intressanta djupen. En avvägning gjordes här mot att modellen blir långsam med många lager, då antalet beräkningsiterationer samtidigt måste ökas. 26 lager har använts till att huvudsakligen täcka in de översta 4,6 metrarna i markprofilen (fig. 3.7). Samtidigt som det förväntade tjäldjupet styrde totaldjupet av tunnare lager styrde de olika simulerade konstruktionernas design var gränser skulle gå mellan skikten. Vid grafisk presentation av simuleringarna var det exempelvis lättare att avgöra om tjälen nått in i tatkärnan om lagren hade en gräns just vid djupet för tatkärnans överkant. Därför blev det en till synes ostrukturerad indelning av lagrens tjocklekar. Vid varje simulering bestämdes vilken kombination av material som skulle studeras, och hur djupa materialens horisonter skulle vara. Detta styr då automatiskt vilka lager som tillhör vilken horisont, och egenskaperna i lagret styrs av egenskaperna hos horisonten.



Inställningarna i COUP-modellen av tjockleken hos 26 simulerade jordlager

Eftersom COUP-modellen uppskattar värmeledningsförmågan automatiskt för varje lager, och det för vissa material fanns noggrannare kännedom om värmeledningsförmågan, justerades den aktuella horisontens alla lager i dessa fall om med beräknade skalningskoefficienter.

Beräkningstekniska inställningar: COUP-modellen är en explicit modell som beräknar det nya tillståndet i ett lager baserat på det föregående tidsstegets tillstånd tillsammans med nya indata. Detta gör att modellen kan bli instabil om tidsstegen blir för långa. Fördelen med detta är vi då märker om tidsstegen är fel och påverkar simuleringarna på ett onaturligt sätt. Tidssteget för beräkningarna varierades mellan 64, 128 och 256 iterationer per dygn under den simulerade tidsperioden av ca 7 år.

Vid COUP-simuleringarna varierades tidssteget för beräkningarna mellan 64, 128 och 256 iterationer så att vi kunde försäkra oss om att resultatet från simuleringarna inte ändrades mycket beroende på detta. Hade den gjort det vore den instabil, vilket kunde åtgärdas med halvering av tidsstegen tills att resultaten stabiliseras.

Bilaga 5 Specifika materialinställningar, utförande

Nedan anges vilka inställningar som gjorts för varje materials horisont, för att särskilja materialens olika tjälände egenskaper från varandra. Som grund vid inställningen av alla horisonter användes moränjorden Swedish Tills djupaste delar, som finns inlagrad i modellens databas (400:1). Nedan redovisas hur denna moränjord sedan manipulerades på olika sätt för att spegla alla Aitik-material. De av Swedish Tills inställningar som inte nämns nedan har heller inte ändrats, varför vissa av inställningarna är gemensamma för många eller alla material som studerats med modellen.

Anrikningssand (0-2 mm): För att efterlikna A-sandens egenskaper har siktkurvor (bilaga 1) för tre prover använts som underlag för att uppskatta en representativ kornstorleksfördelning. COUP-modellens funktion Estimate from Texture användes för att beräkna koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation utifrån medelvärdet av provernas andelar av olika fraktioner (Parameter Tables/Soil Hydraulics/Brooks-Corey water retention measured horizon/estimate new curve). Konstanterna anges i tabell 4.2.1 i bilaga 4. Skalningsfaktorn -0,243 (bilaga 5) användes för att korrigera den av modellen automatiskt uppskattade värmeledningsförmågan närmare den uppmätta från köldlab. Porositeten uppskattades till 35 % i samråd med Per-Erik Jansson och ämnesgranskare (genom att saturation sattes till 35).

0-5 mm: Koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation beräknades utifrån kornstorleksfördelningen med ett program skrivet i MATLAB. För det finkorniga materialet 0-5 mm fanns ingen siktkurva att tillgå. En mycket grov uppskattning av materialets kornstorleksfördelning erhöles genom att kornstorleksfördelningen från 0 mm upp till 5 mm kopierades från siktkurvan för materialet 0-50 mm. Den kopierade fördelningen skalades sedan om så att den kumulativt uppgick till 100 % vid gränsen 5 mm (bilaga 1). Koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation anges i bilaga 4. Värdet för Residual Water, som motsvarar det vatten som inte kan dräneras bort, har ändrats till 3 (från 0) för att ligga mellan värdet för A-sand och moränmaterialet. Porositeten ändrades till låga 30 % för att efterlikna materialets täta struktur. Skalningsfaktorn som justerar värmeledningsförmågan beräknades till 0,1184 (bilaga 5) vilket användes för alla lager med materialet 0-5 mm vid simuleringar.

Subb (0-40 mm): MATLAB-programmet användes för att uppskatta parametrarna till Brooks-Coreys ekvation (bilaga 4) utifrån en siktkurva (bilaga 1) uppmätt för materialet i juni 2006*. Materialets porositet uppskattades i samråd med Klas Hansson och justerades till 40 %. Parametern Residual Water justerades upp från 0 (noll) till 0,3 vol % för att motsvara

* Siktkurvan fick vi från Martin Lundqvist på NCC Roads AB

moränen i dammen. Eftersom vi fick kännedom om subb-materialet för sent för att vi skulle hinna utreda dess värmeledningsförmåga i köldlabb användes istället COUP-modellens automatiskt uppskattade värmeledningsförmåga för materialet i horisonten.

0-50 mm: En siktkurva från 2001 (bilaga 1) användes som underlag för att beräkna koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation med MATLAB-programmet (bilaga 4). Parametern Residual Water justerades liksom för Subb-materialet upp från 0 (noll) till 0,3 vol %. Skalningsfaktorn för att anpassa modellens värmeledningsförmåga till den i köldlabb uppmätta beräknades till 0,0208 (bilaga 5). Porositeten uppskattades till höga 40 % eftersom materialet inte innehåller så mycket fint material, och större luftfickor borde bildas.

5-50 mm: Koefficienterna till Brooks-Coreys ekvation (bilaga 4) beräknades med MATLAB-programmet utifrån representativ siktkurva (bilaga 1) från 2003. Porositeten uppskattades till höga 50 % eftersom materialet inte innehåller något fint material, och därför förväntas innehålla många stora luftporer. Skalningskoefficienten beräknades för att justera COUP-modellens uppskattade värmeledningsförmåga att överensstämja med den som uppmättes på köldlabb (bilaga 5). Eftersom beräkningen gav en orealistiskt hög skalningskoefficient (0,6) reviderades denna sedan ner till 0,3 och användes för 5-50 mm horisontens alla lager.

Isolerings-skivor: Markisoleringen utgörs på dammens krön av 0,1 meter Styrofoam (250 SL-A-N, falsade kanter) och 0,1 m billigare cellplast (substitut med sämre hållfasthet) på sluttningen. Båda sorters värmeledningsförmåga är $0,037 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Isolerings-skivorna uppges vara mycket täta, där exempelvis mindre än 2 % vatten tränger in i Styrofoam-skivorna på många år i mark i form av gasvandring. Då inga grundmallar finns för isolerings-skivor i modellen användes jorden Swedish Till för att ge grundinställningarna till horisonten med markisolering. För att anpassa denna sattes horisonten med isolerings-skivor till 0,1 meters tjocklek, saturation ändrades från 33 till 2 procent för att simulera ett mycket torrt lager, den hydrauliska ledningsförmågan ändrades från 34 till 0,001 mm/dygn och lagrets värmeledningsförmåga skalades om med skalningsfaktorn -1,97 (tabell 6.2, bilaga 5) för att anpassa COUP-modellens automatiskt uppskattade värmeledningsförmåga till isolerings-skivornas faktiska värde.

Snöfångare: För att genomföra en simulering med nät som behåller och fångar upp snö på dammen genomfördes en del speciella inställningar. Först stängdes snöplogningen av medan snömängden korrigerades till att ligga på en konstant nivå under delar av året. Detta gjordes genom att ändra *SnowAdjustment* till "Forced to match continuous" vilket gör att modellen hämtar in snödata från en PG-fil (snow.bin). Filen snow.bin skapades för att på ett enkelt sätt beskriva det snödjup som snöfångarna är tänkta att lagra under vinterhalvåret. Snöfilen lagrar information om tidpunkt (12:00) och snödjup för den aktuella tidsperioden för simuleringarna

(990501 - 061211), där snödjupet är 0 (noll) meter mellan 31/5 och 17/10 och 1,5 meter mellan 1/11 och 1/5. Upplagringen av snö skedde med en ökning av 0,1 meter per dag och minskningen (smältningen) av snödjupet med 0,1 meter varannan dag. Eftersom snö packas hårdare i snöfångare än den gör under normala förhållanden (Ludde, personlig intervju) ställdes snöns densitet om från 100 till 300 kg/m³ genom att parametern DensityOfNewSnow ändrades.

Bilaga 6 Meteorologiska data

Klimatdata med 6 månaders användningslicens köptes från SMHI från både manuella och automatiska mätstationer i området, daterat så långt tillbaka som 1971. Dessa kom från Gällivare flygplats, Gällivare, Malmberget samt Gällivare automatstation och innehöll dygnsmedeltemperatur, dygnsnederbörd, samlad molnmängd, relativ luftfuktighet, vindriktning och vindhastighet. Bland dataserierna valdes den bästa perioden ut, med så få luckor som möjligt i en längre dataserie. Perioden 990501-0601211 från Gällivare automatstation ansågs vara bäst och de luckor som fanns i observationerna täpptes igen med medelvärden av omkringliggande dagar. Utav materialet skapades en PG-fil (clim2.bin) som COUP-modellen ställdes in att läsa av för att få information om relativ luftfuktighet, nederbörd, lufttemperatur och vindhastighet. Detta utfördes genom att valet Read from PG-file markerades för alla ovanstående parametrar under Switches/Metrological Data och PG-filen lades in under Model Files.

Markytans årsmedeltemperatur ändrades till 3 grader från 10 med parametern *TempAirMean*. Jordens initiala temperatur ställdes in till 2 grader från 10 för att bättre återspegla verkligheten vid simuleringsperiodens start (*SoilInitTemp* → 2). Eftersom SMHI erbjuder globalstrålning utan kostnad på deras hemsida ändrades *RadGlobInput* till att läsa in data från PG-fil istället för att genereras från COUP-modellens funktioner. En PG-fil med globalstrålning för Aitik koordinater skapades (omräknat till enheten $\text{J dygn}^{-1} \text{m}^{-2}$) och lades ihop med licensierad klimatdata i PG-filen clim2.bin.

För att representera att den snö som faller på den vindpinade dammen normalt sett blåser bort ganska snart ställdes modellen in på att dammen plogas ner till ett snödjup av 5 cm så snart snödjupet når över 5 cm, genom att *Plowing* ändrades till Driven by SnowMass och *PloughSnowMass* ändrades från 3 till 15 vattenekvivalenter (*SnowDensity* 100). Dammen blir mycket sällan helt kal från snö och albedot (som modellen använder i reflektionsformeln som bestämmer instrålningen i dammen) förblir detsamma som för snö. Latitudkoordinaten ställdes in till 65.

Övriga inställningar som skiljer sig från defaultinställningarna för metrologiska data är: *CloutInput* → Estimated, *HumRelInput* → Read from PG-file, *PrecInput* → Read from PG-file, *TempAirCycle* → Annual, *TempAirInput* → Read from PG-file, *VapourAirInput* → As relative humidity.

Genomförande av COUP-modellering

Simuleringarna med COUP-modellen genomfördes systematiskt (tabell nedan) för att täcka in alla olika kombinationer av lösningar. Alla Aitik-material simulerades först med en mäktighet

av 2,6 meter ovanpå dammen, då detta bedömdes vara ett slags medel vid inledande simuleringar av tjälnedträngning. Utöver detta simulerades alla kombinationer av två olika Aitik-material ovanpå varandra. Vid dessa simuleringar användes en mäktighet av 1,3 m för både det övre och undre materialet.

Alla simulerade kombinationer av Aitik-material. Översta horisonten anges i överkant och undre materialet i vänsterkant. I tabellens celler anges vår beteckning för kombinationen.

Under/Över	A-sand	0-5	Subb	0-50	5-50
A-sand	A-s_2,6m	0-5_A-s	Subb_A-s	0-50_A-s	5-50_A-s
0-5	A-s_0-5	0-5_2,6m	Subb_0-5	0-50_0-5	5-50_0-5
Subb	A-s_Subb	0-5_Subb	Subb_2,6m	0-50_Subb	5-50_Subb
0-50	A-s_0-50	0-5_0-50	Subb_0-50	0-50_2,6m	5-50_0-50
5-50	A-s_5-50	0-5_5-50	Subb_5-50	0-50_5-50	5-50_2,6m

Marktemperaturerna samt övre och undre frostgräns plottades upp från simuleringarna för olika lagerdjup i markprofilen. Graferna redovisar vilket år tjäldjupet är som störst, och vilket lägsta djup som uppvisar negativa temperaturer.

Bilaga 7 Koefficienter Brooks-Coreys ekvation

Tabell 6.1 Använda koefficienter för olika material till Brooks-Coreys ekvation

	Lambda [-]	Air Entry [cm]	Satur- ation [vol%]	Wilting Point [vol %]	Residual Water [vol %]	Matrix Conduc- tivity [mm dag ⁻¹]	Total Conduc- tivity [mm dag ⁻¹]	nTour- tosity [-]	Scaling Coeff. [-]
A-sand	0,482462	15,814	35	4,7	5,4187	494,1641	494,1641	1	-0,243
0-5 mm	0,31065	2,2674	30	4	3	1728	1728	3,945	0,1184
Subb	0,28371	0,23457	40	4	0,3	9504	6000	23,402	0
0-50 mm	0,43541	0,04487	40	4	0,3	7776	7776	1,64351	0,0208
5-50 mm	1,58347	0,1914	50	4	0,152	12960	12960	8,7	0,3
Stödfyllning	0,16	10	33	4	0,3	34	34	1	0
Tätkärna	0,16	10	20	4	0,3	20	20	1	0
Markskiva	0,16	10	2	4	0,3	0,001	0,001	1	-1,97

Förklaring:

Lambda – porstorleksfördelningsindex, med ett stort lambda och litet Air Entry beskrivs en grovkornig jord

Air Entry – motsvarar trycket då vatten börjar bytas mot luft (för att tömma största poren)

Saturation – porvolymen, beror på packningsgraden och på blandningsförhållandet i jorden där blandad fraktion med fina och grov jord ger de minsta porerna

Wilting Point – motsvarar den andel vatten som är kvar vid vissningsgränsen

Residual Water – det vatten som inte kan dräneras bort

Matrix Conductivity – hydraulisk konduktivitet som är en funktion av Total Conductivity vid mättade förhållanden

Total Conductivity – hydraulisk konduktivitet

nTourtosity – anger slingringhet vilket motsvarar hur mycket vatten som färdas genom materialet måste slingra sig ned, i motsats till att rinna rakt nedåt. Desto högre värde desto långsammare vattentransport

Scaling Coefficient – Skalar om önskat jordlagers automatiskt uppskattade värmeledningsförmåga med en skalningsfaktor

Bilaga 8 Skalningsfaktorer för värmeledningsförmåga

Tabell 6.2 Sammanställning av värmeledningsförmågor och beräknade skalningsfaktorer

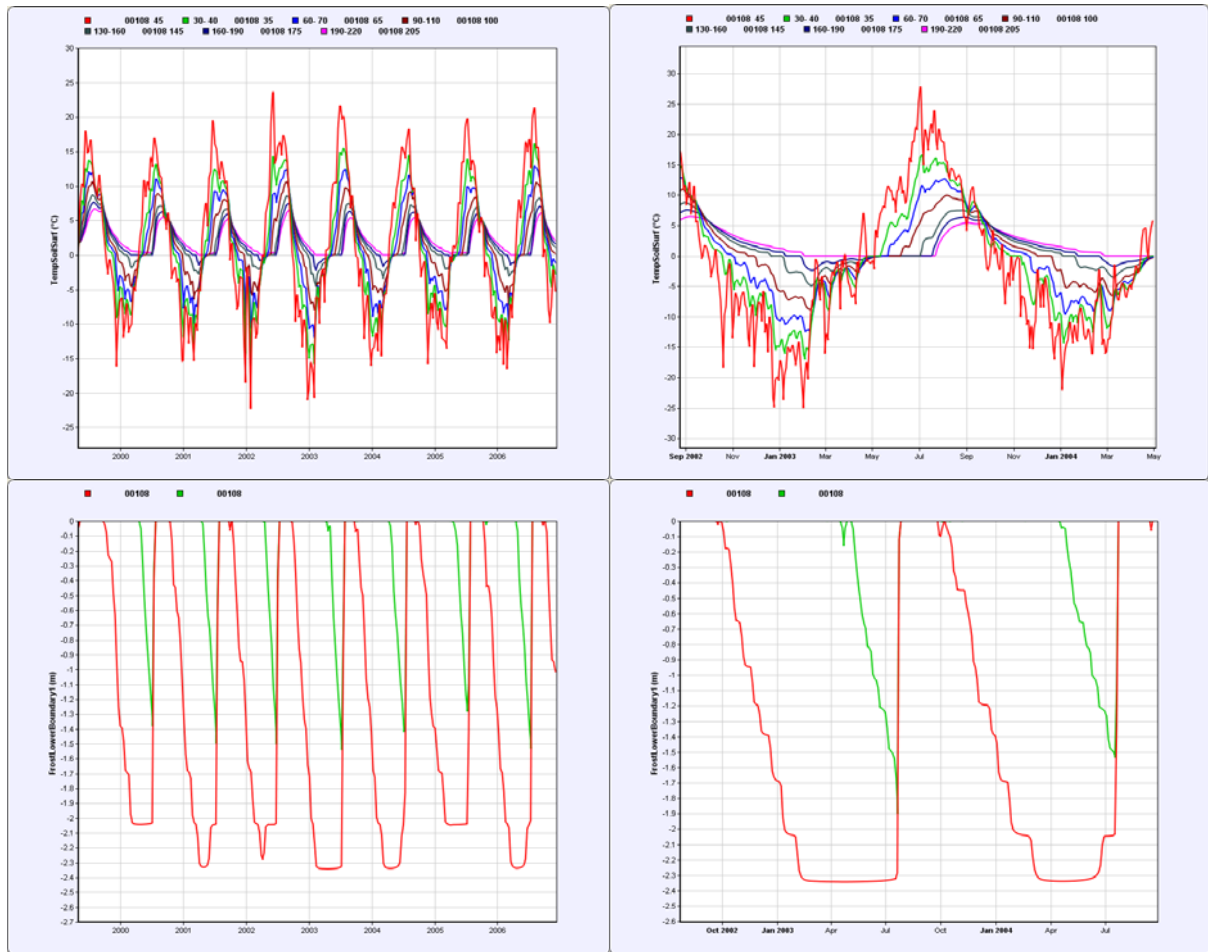
	COUP		Uppmätt		Beräknad skalningsfaktor
	$\lambda(\text{frusen})$	$\lambda(\text{tinad})$	$\lambda(\text{frusen})$	$\lambda(\text{tinad})$	
A-sand (0-2 mm)	1,8	1,3	0,5	1,1	-0,243
0-5 mm	1,4	1,9	1,29	3,14	0,1184
0-50 mm	0,55	1,05	0,63	1,0	0,0208
5-50 mm	0,3	0,8	1,47	2,6	0,6 (ändrad 0,3)
Isoleringskivor	5,6	2,4	0,037	0,037	-1,97

Beräkningsformel för beräkning av skalningsfaktorer:

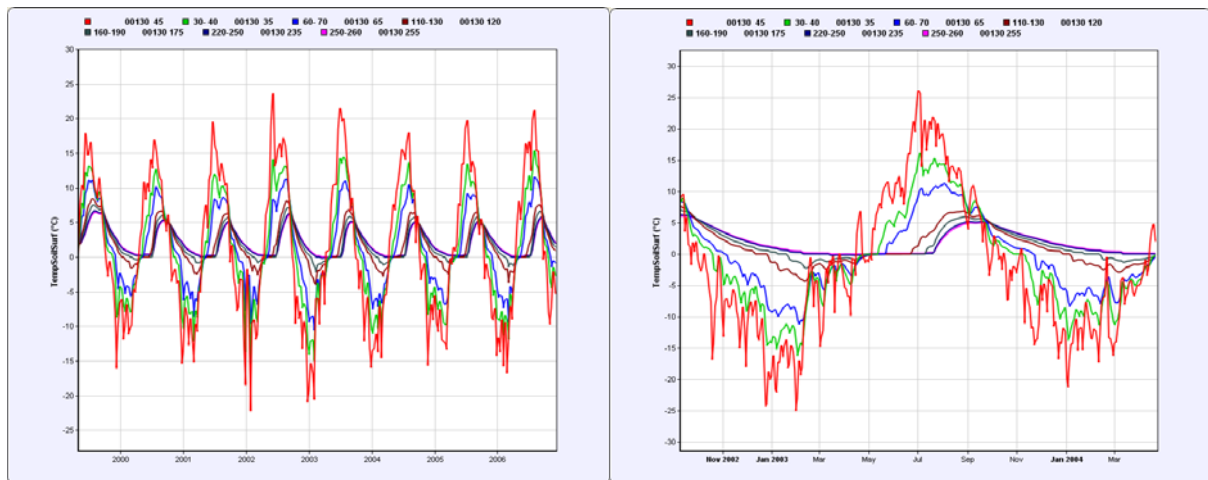
$$\log\left(\left(\frac{\lambda(\text{frusen}, \text{uppmätt})}{\lambda(\text{frusen}, \text{COUP})} + \frac{\lambda(\text{tinad}, \text{uppmätt})}{\lambda(\text{tinad}, \text{COUP})}\right) \frac{1}{2}\right) = \text{Beräknad}_\text{skalningsfaktor}$$

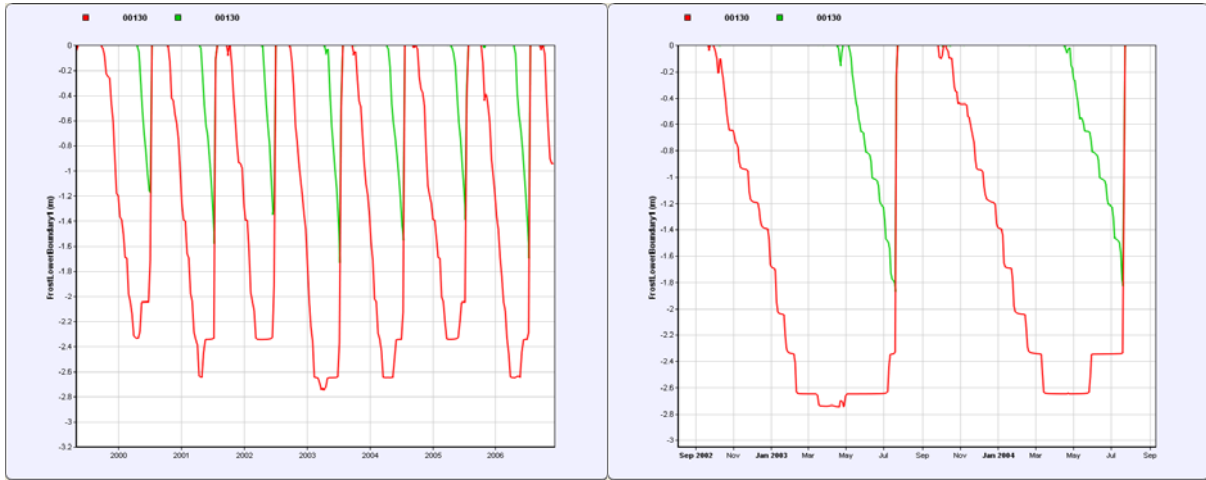
Bilaga 9 COUP-Resultat jämförande studie

A-s_2,6m

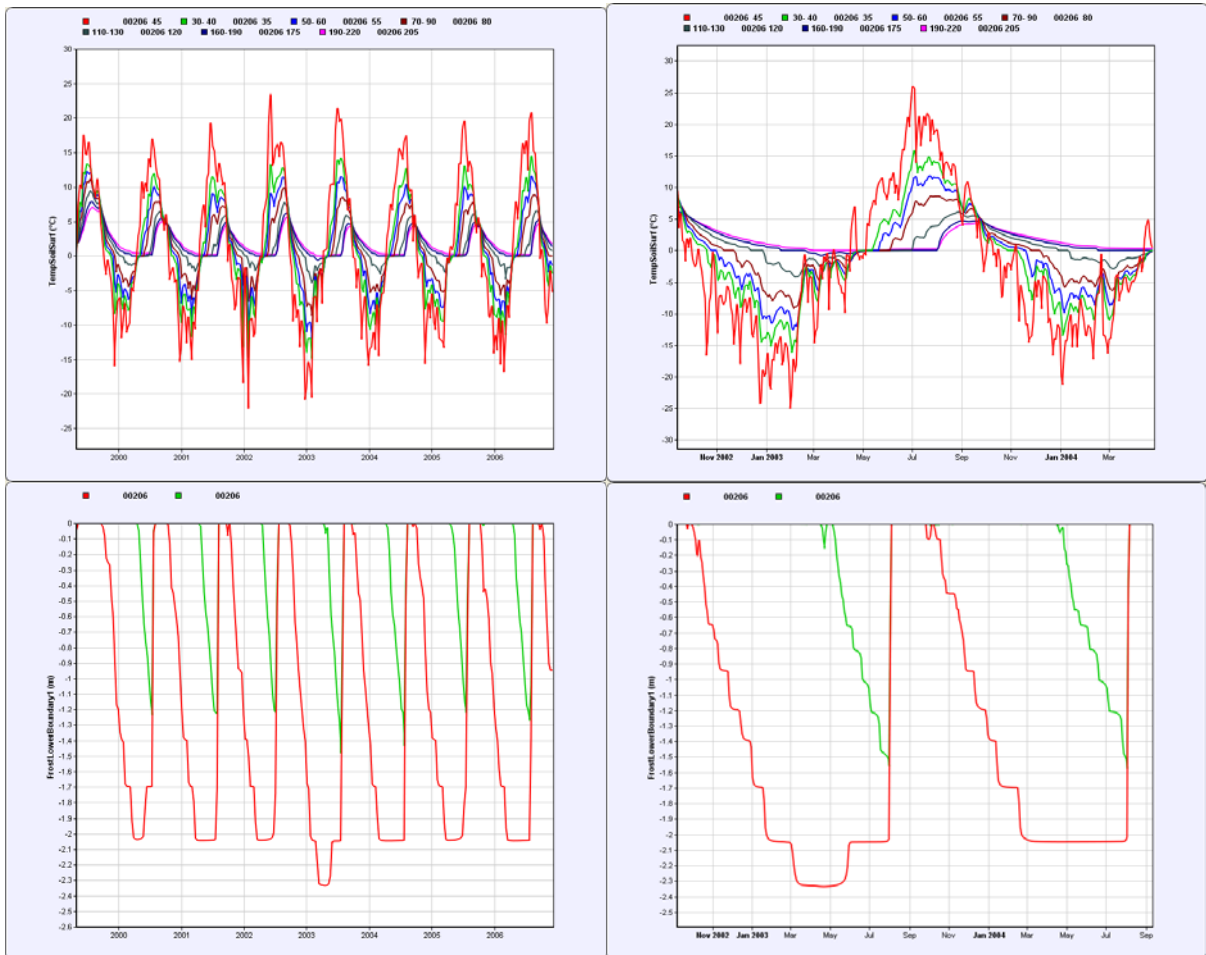


A-s_0-5

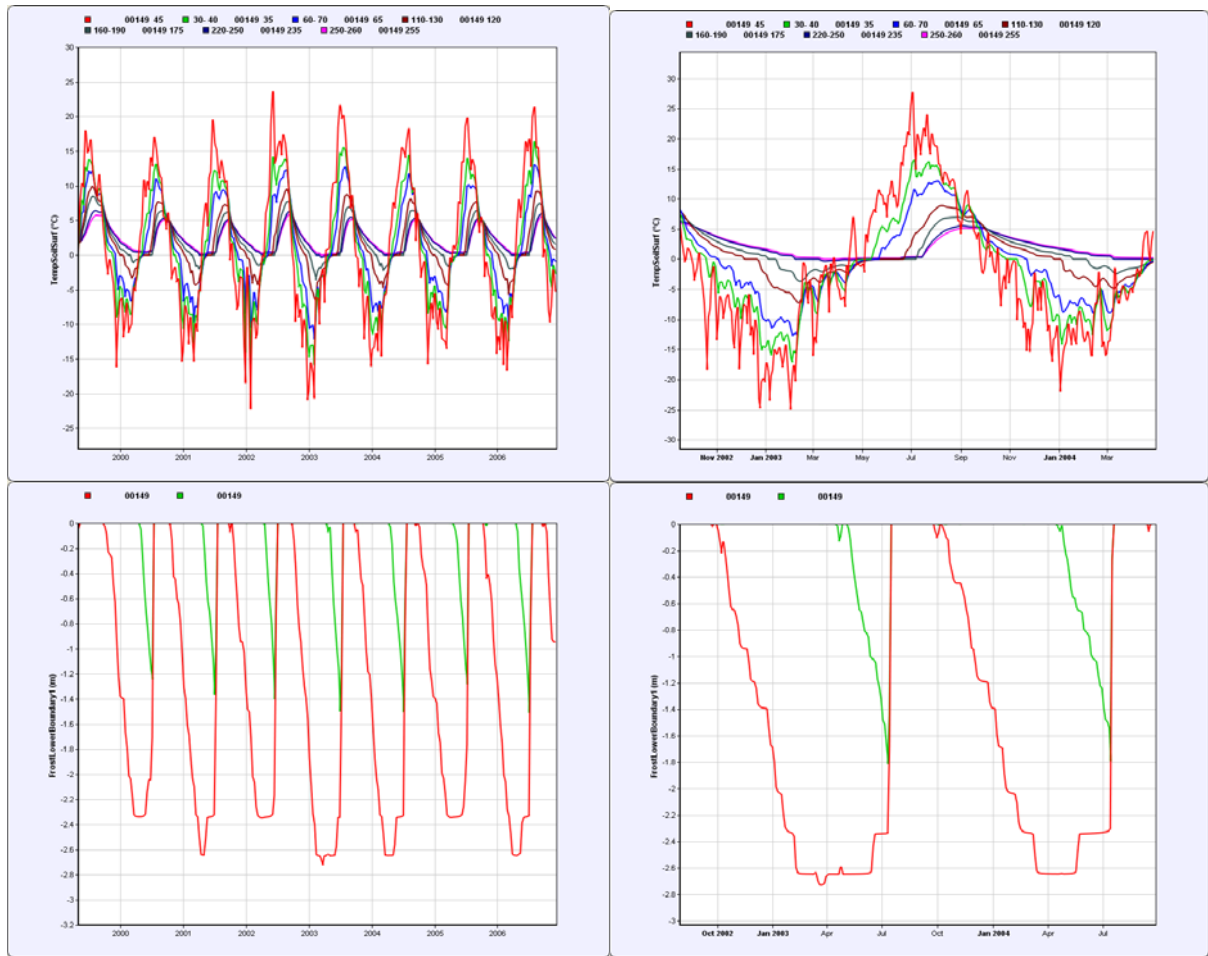




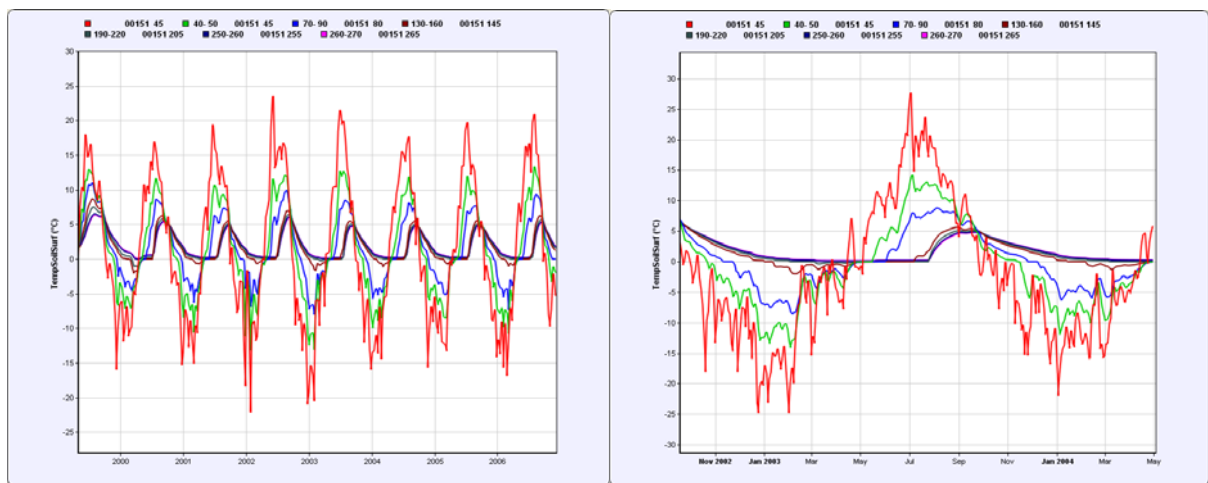
A-s_Sub

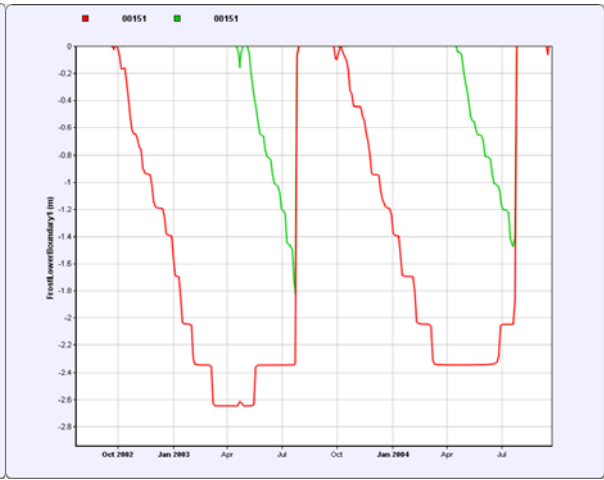
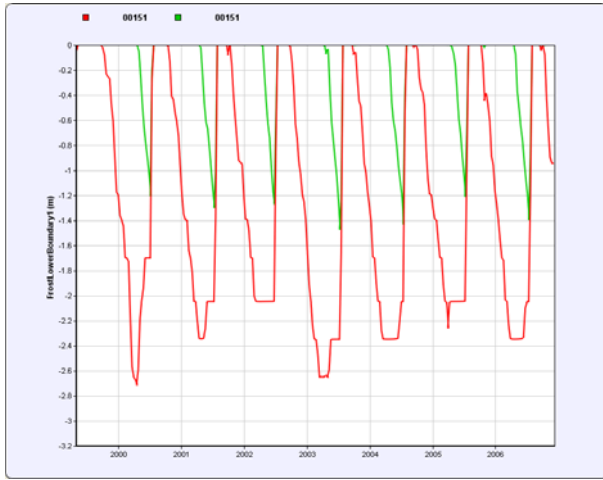


A-s_0-50

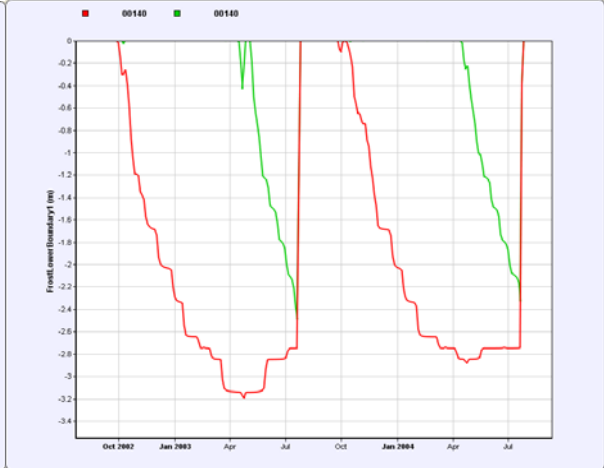
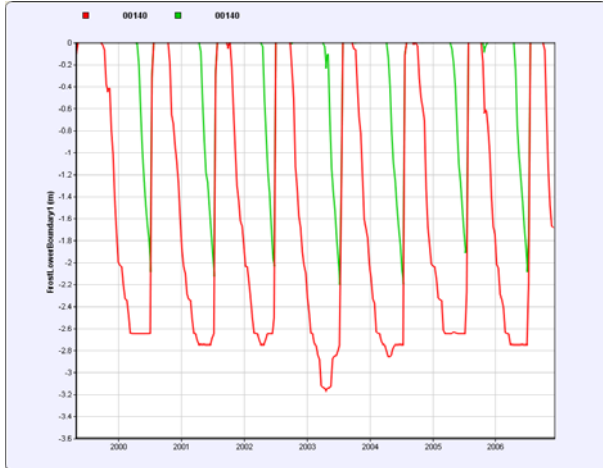
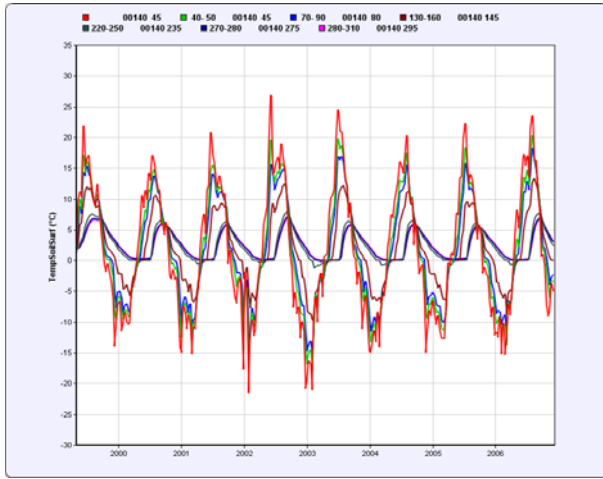


A-s_5-50

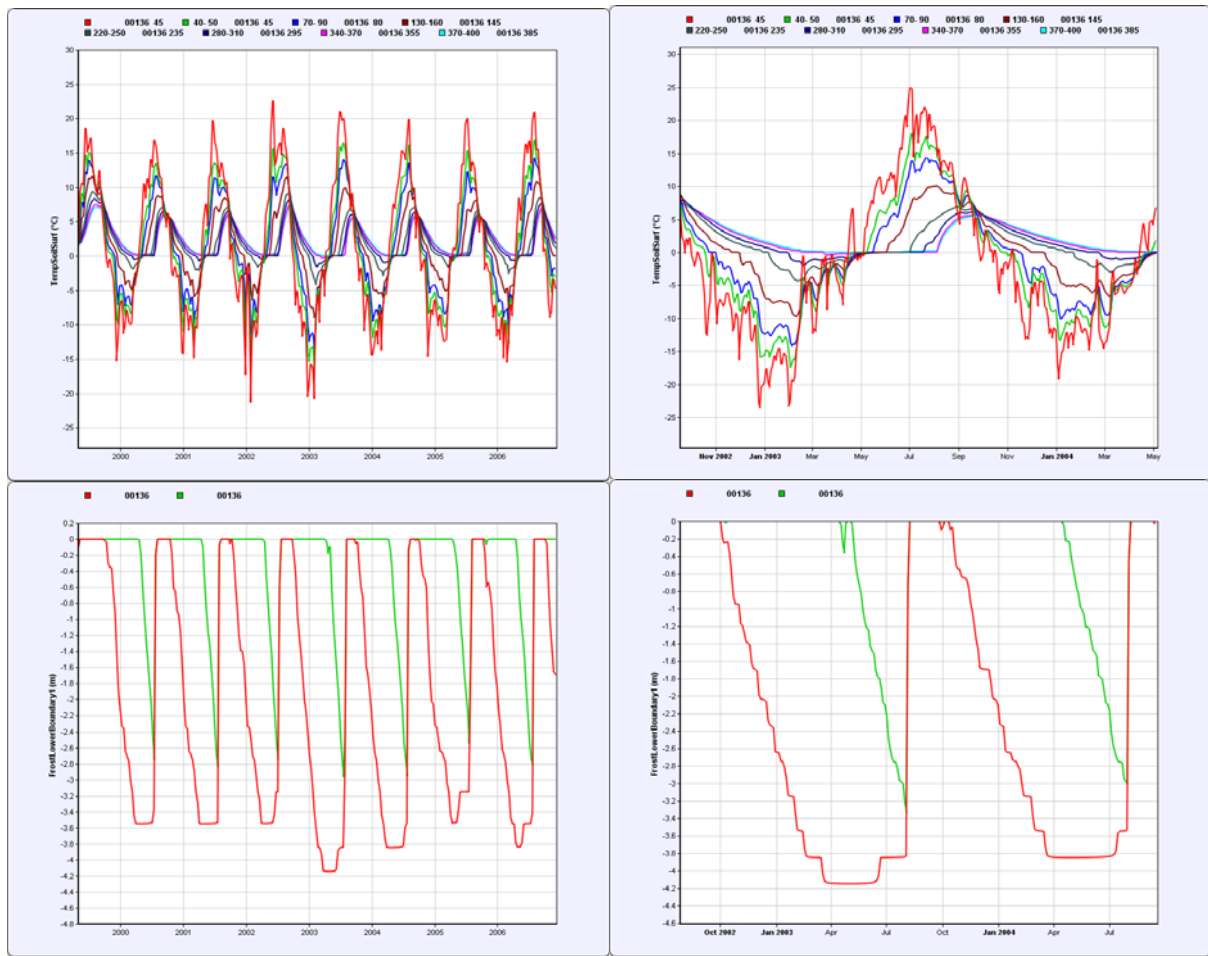




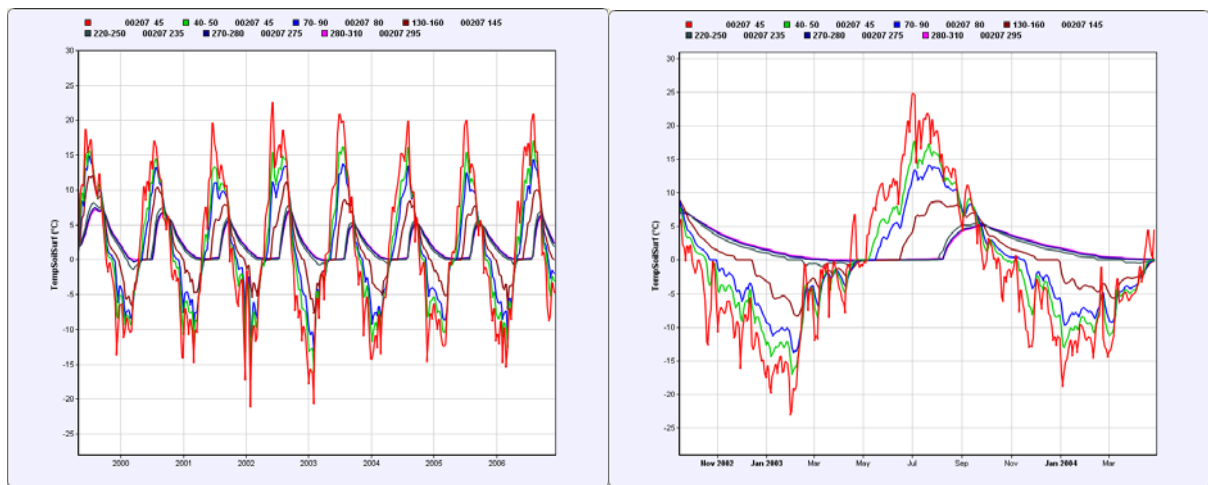
0-5_A-s

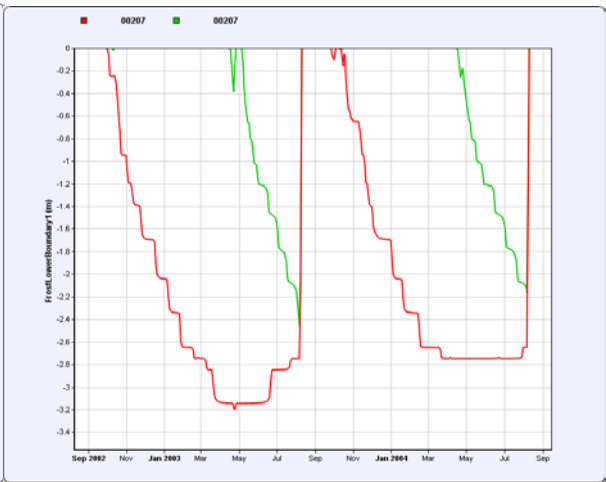
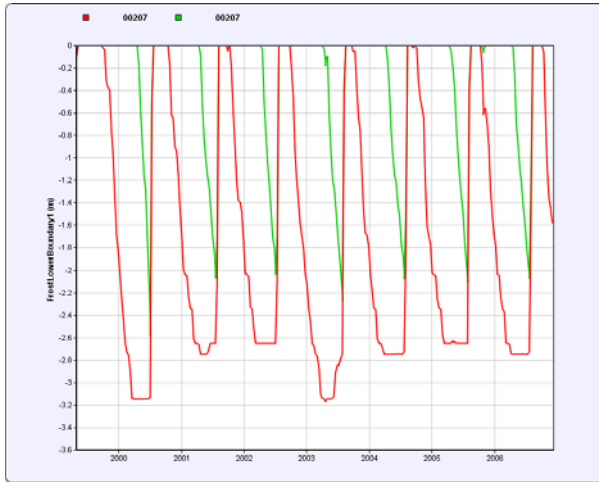


0-5_2,6m

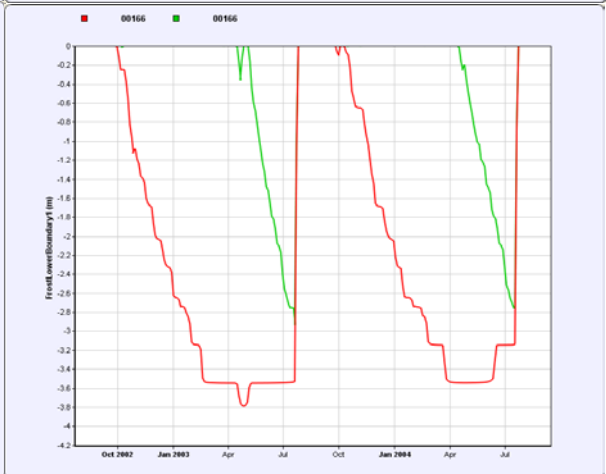
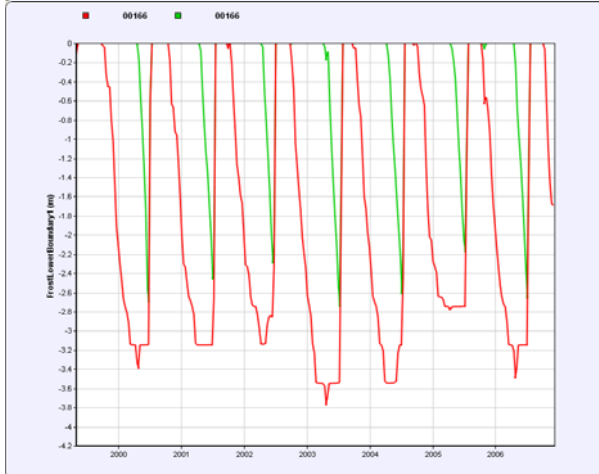
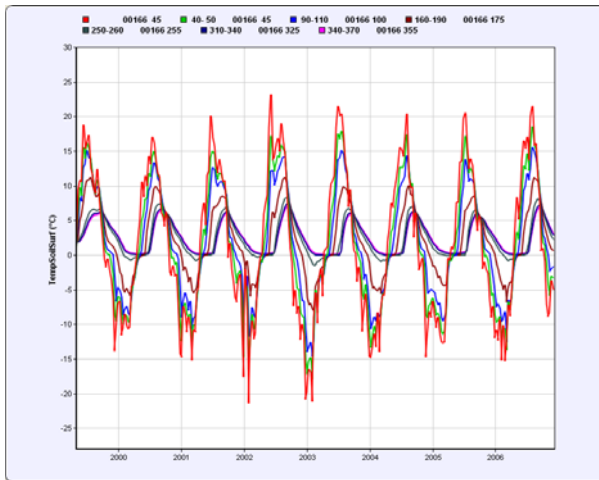


0-5_Subb

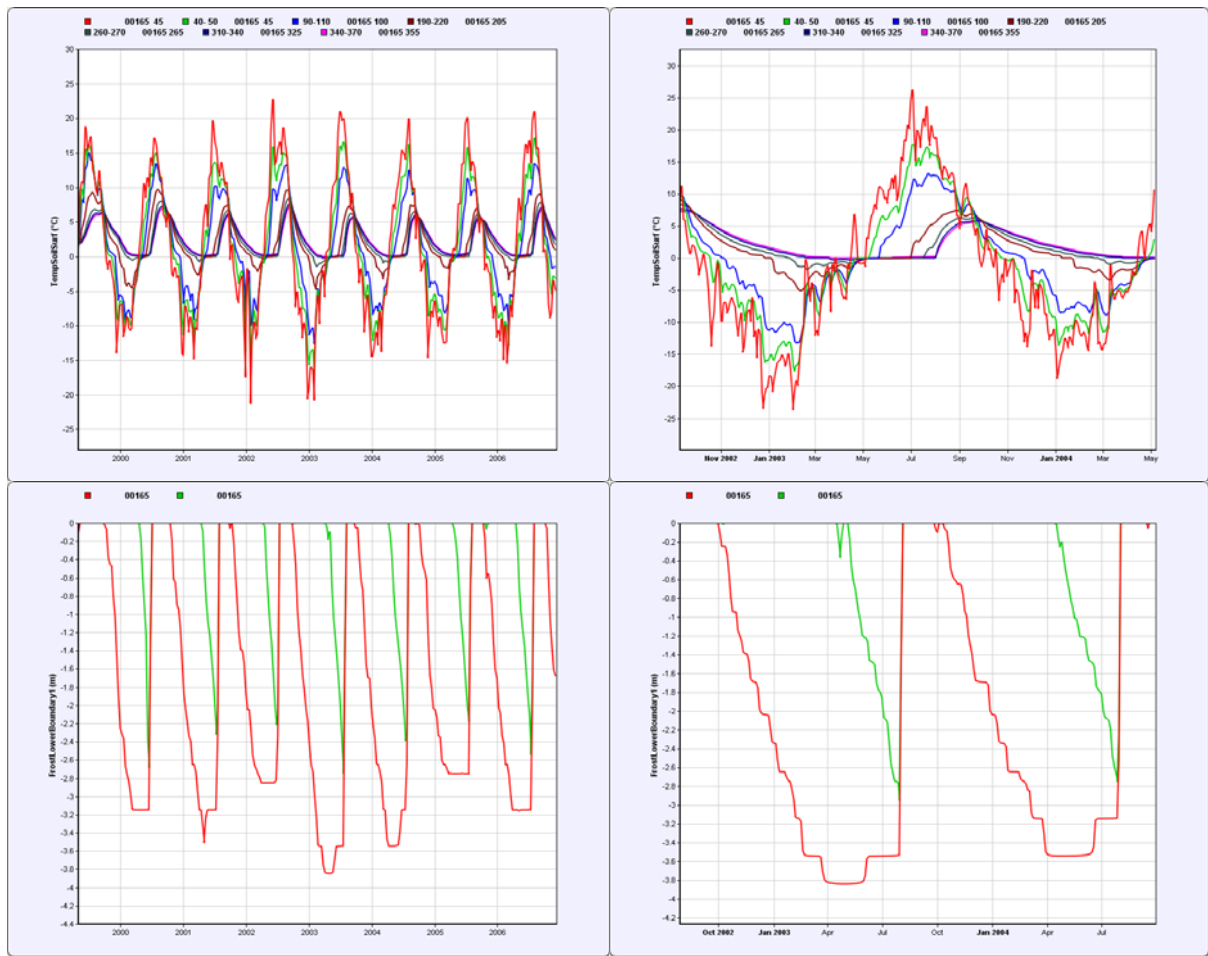




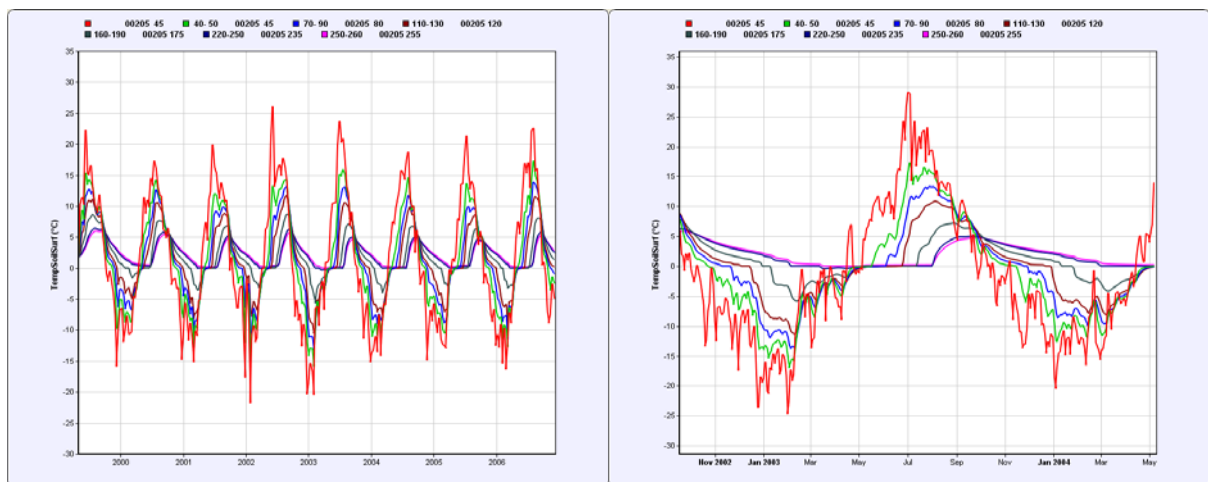
0-5_0-50

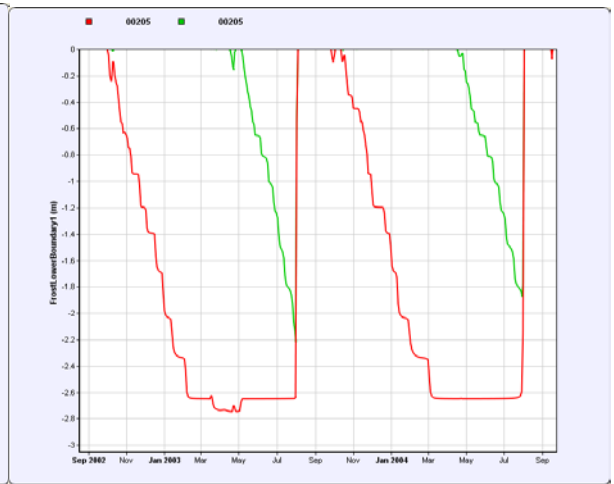
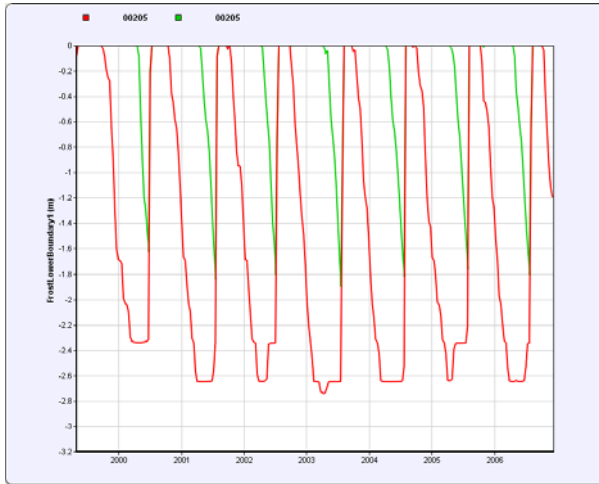


0-5_5-50

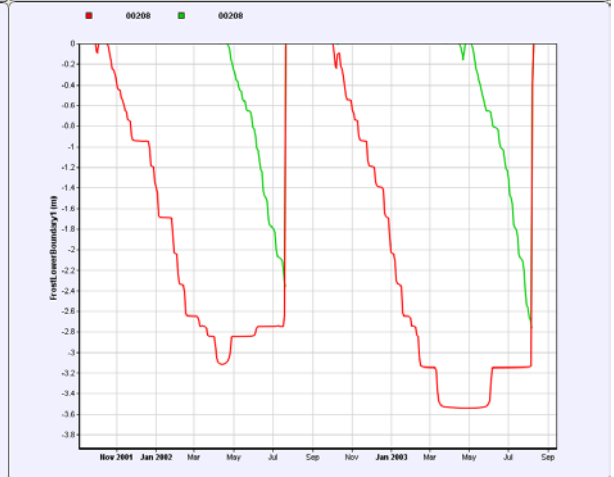
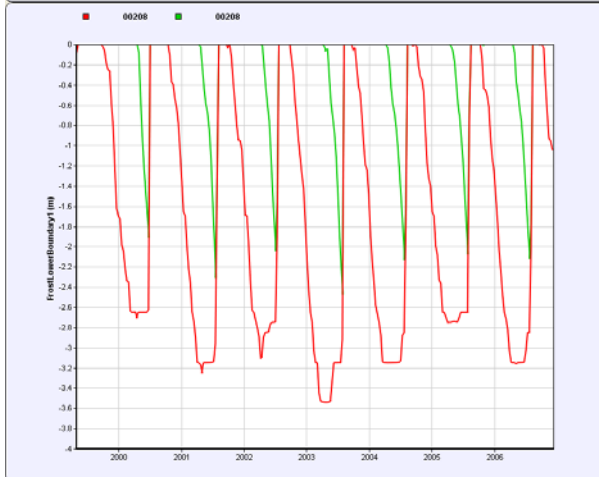
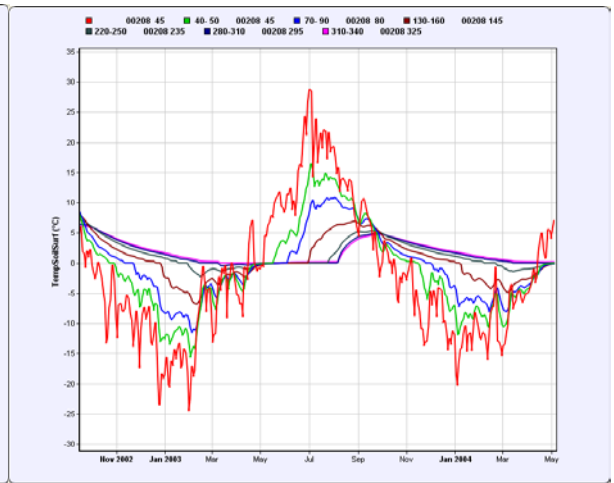
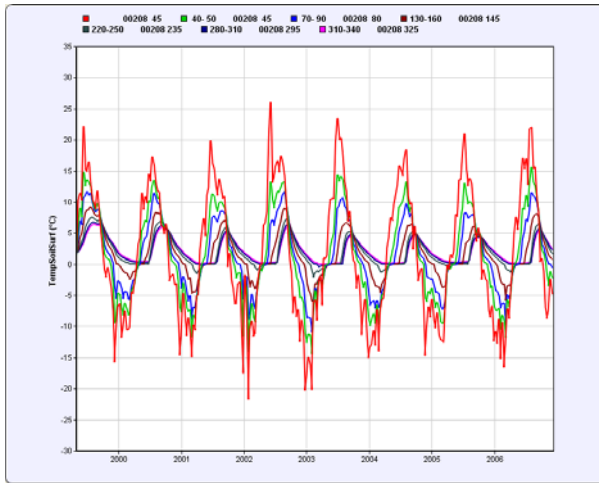


Subb_A-s

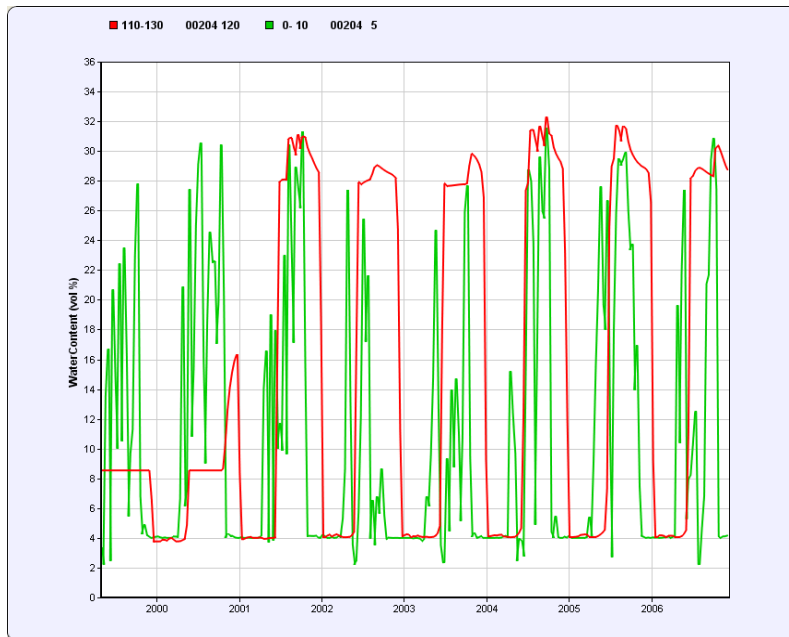




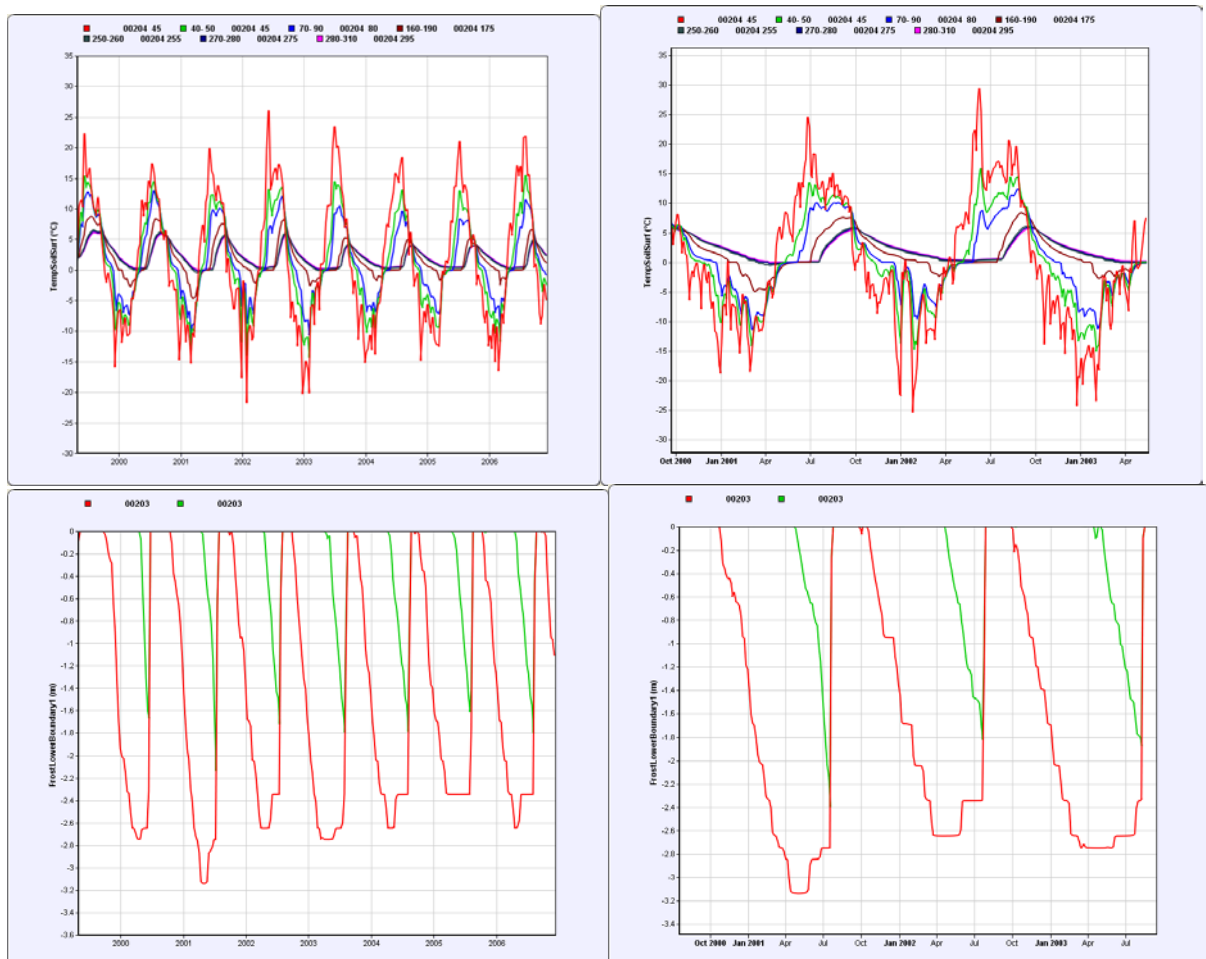
Subb_0-5



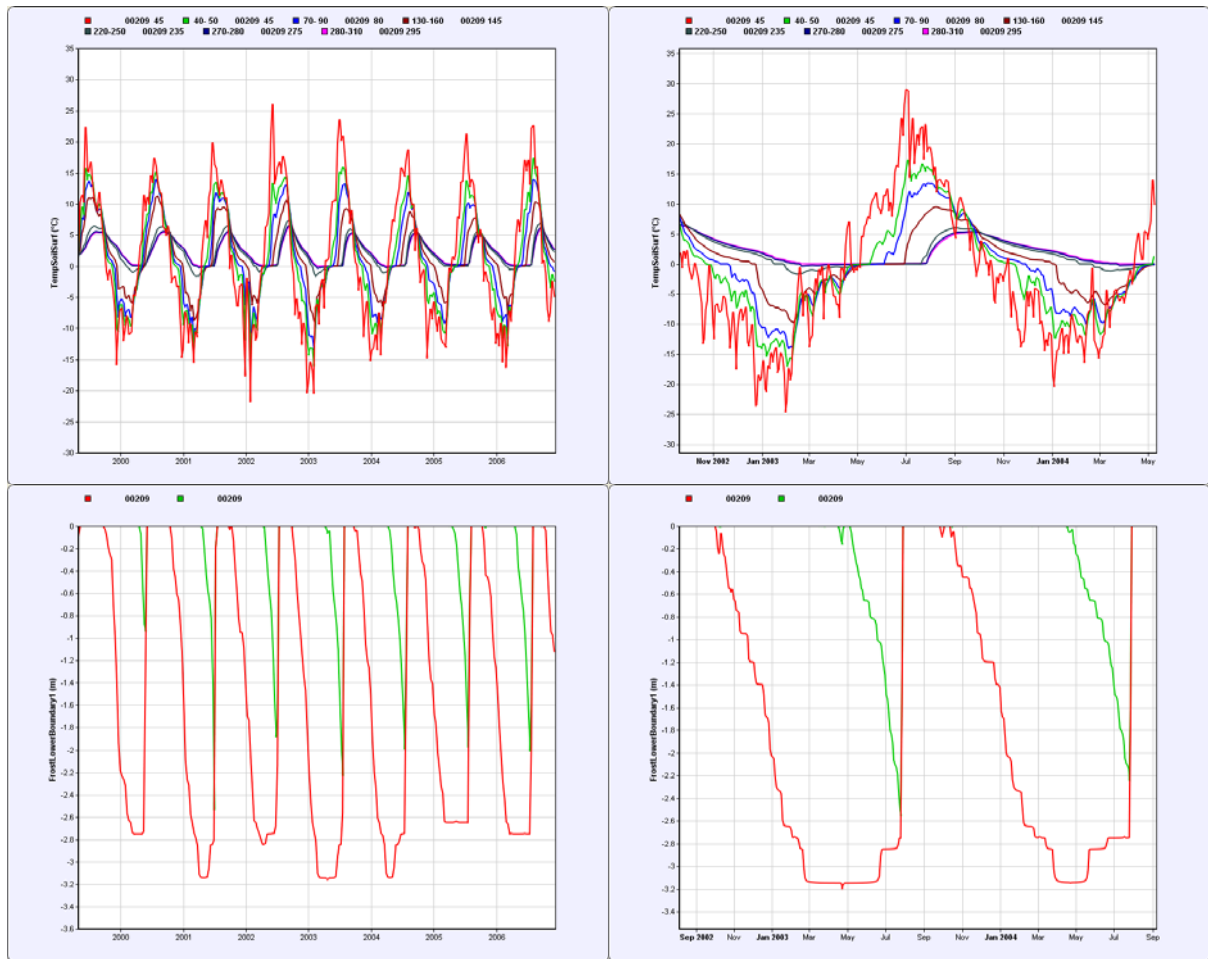
Subb_2,6m



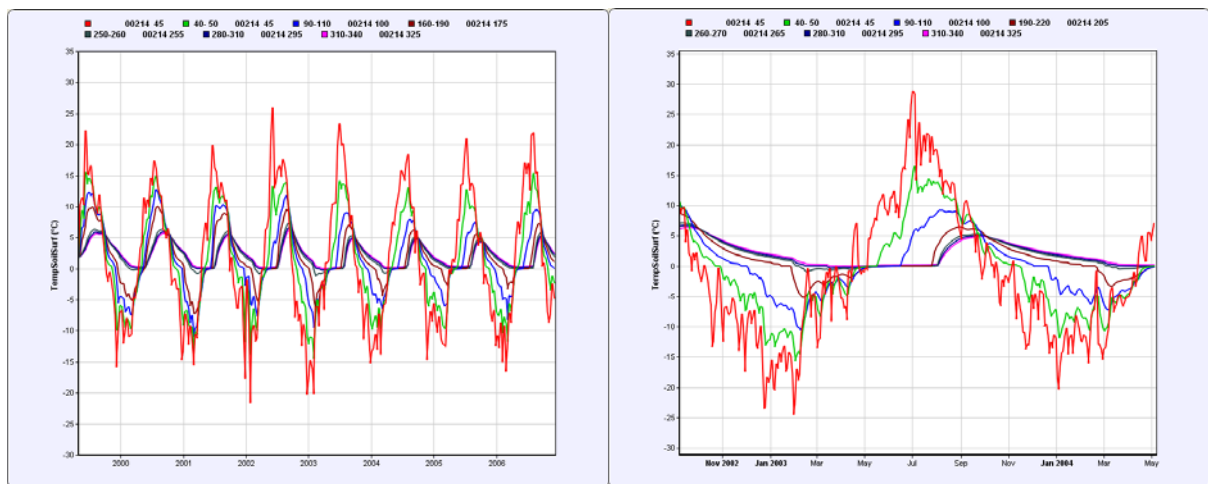
Vattenhalten i marken leder oss att döma ut 2001 som den djupaste tjälen, eftersom jorden på djupet 110 cm och djupare då ännu inte hunnit få en naturlig vattenhalt.

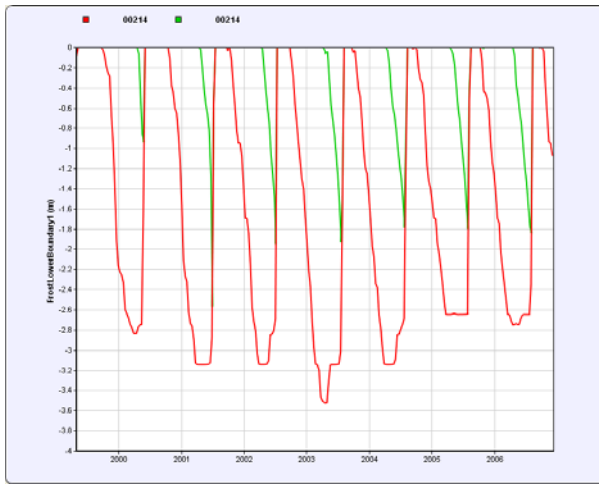


Subb_0-50

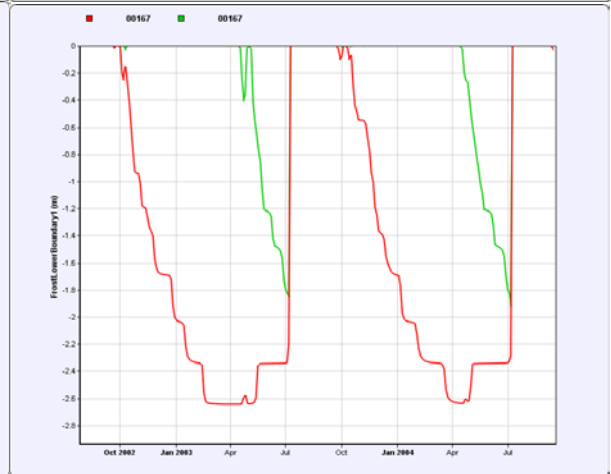
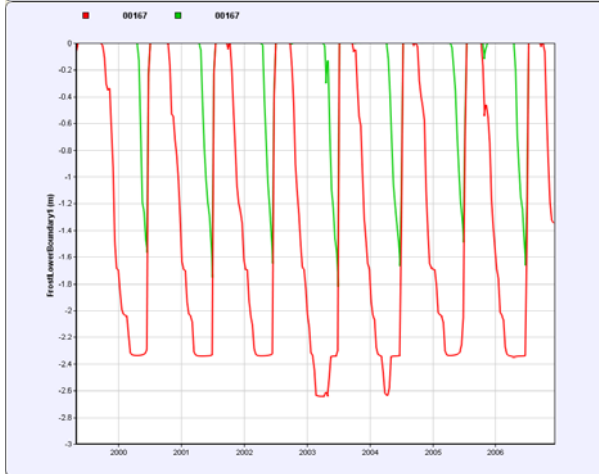
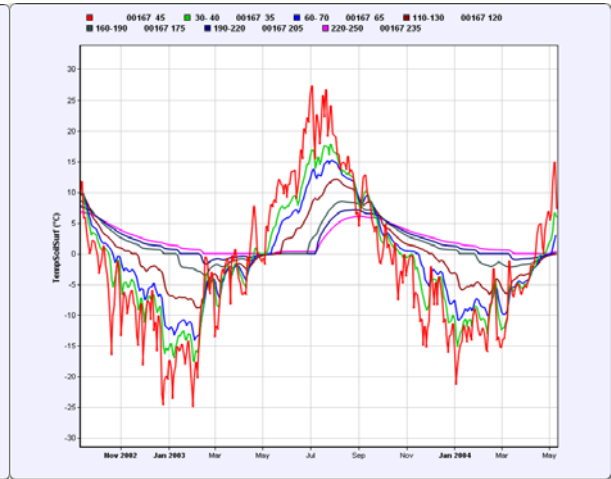
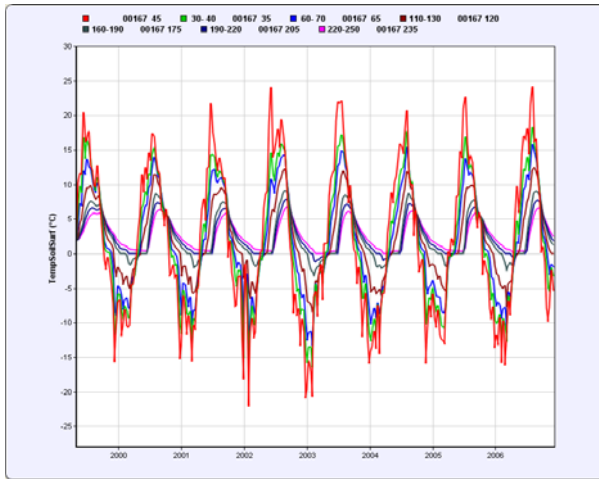


Subb_5-50

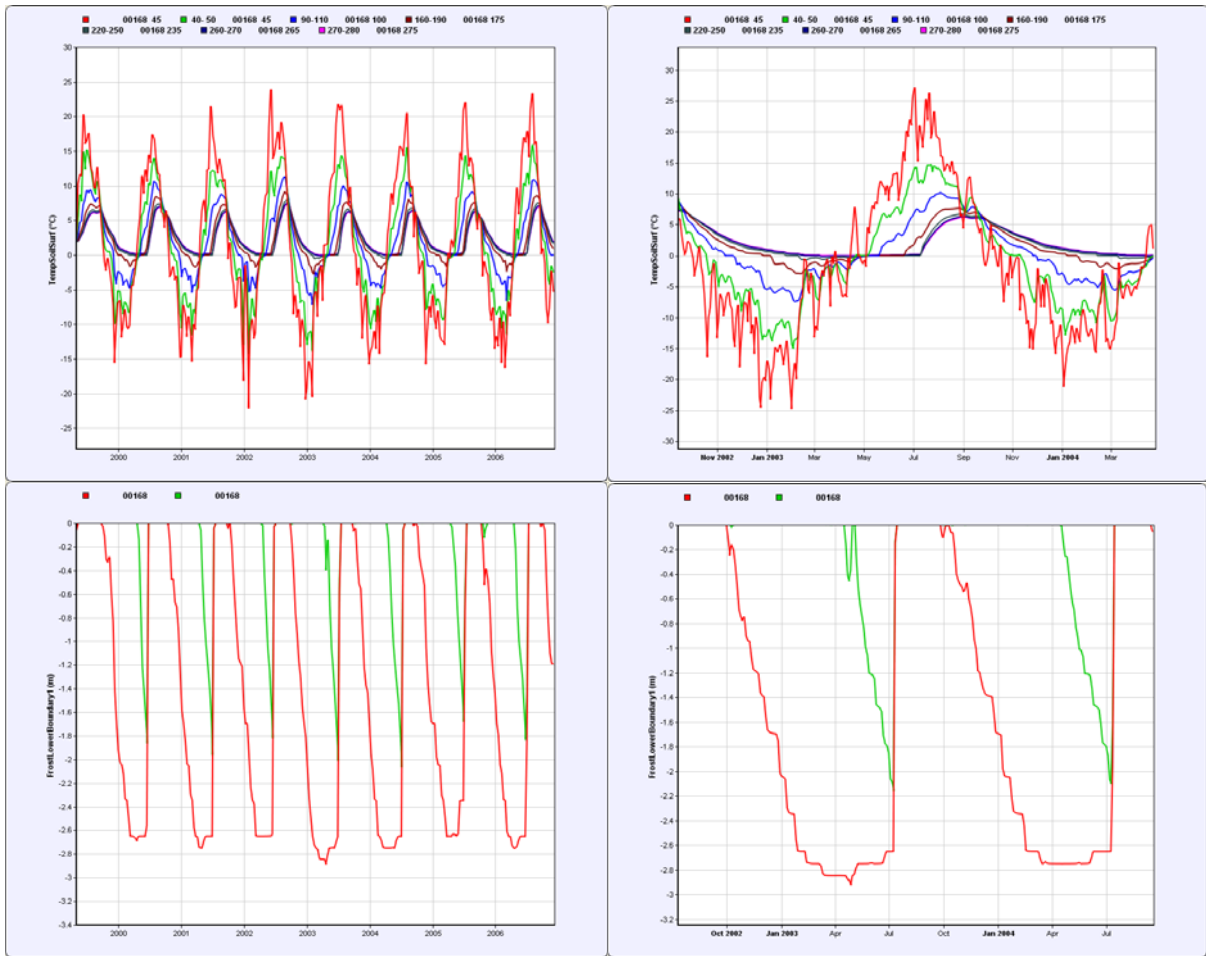




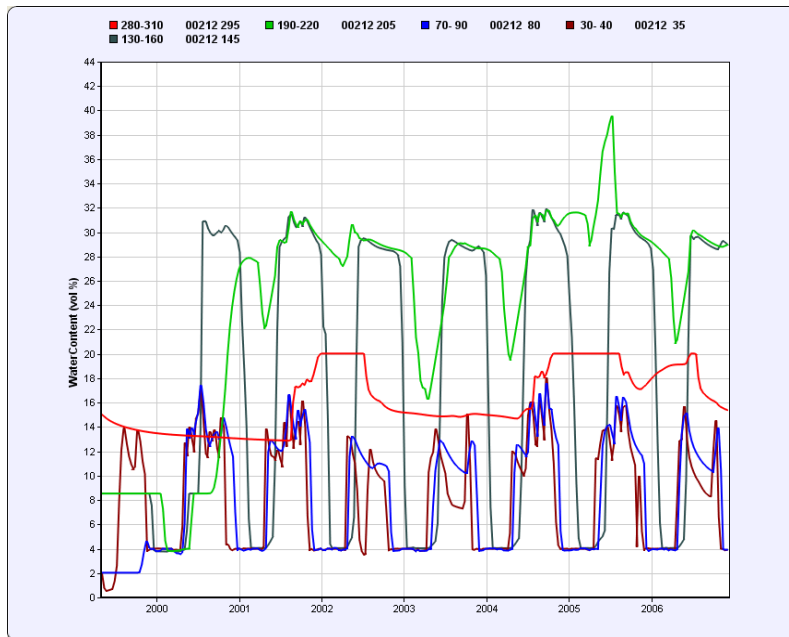
0-50_A-s



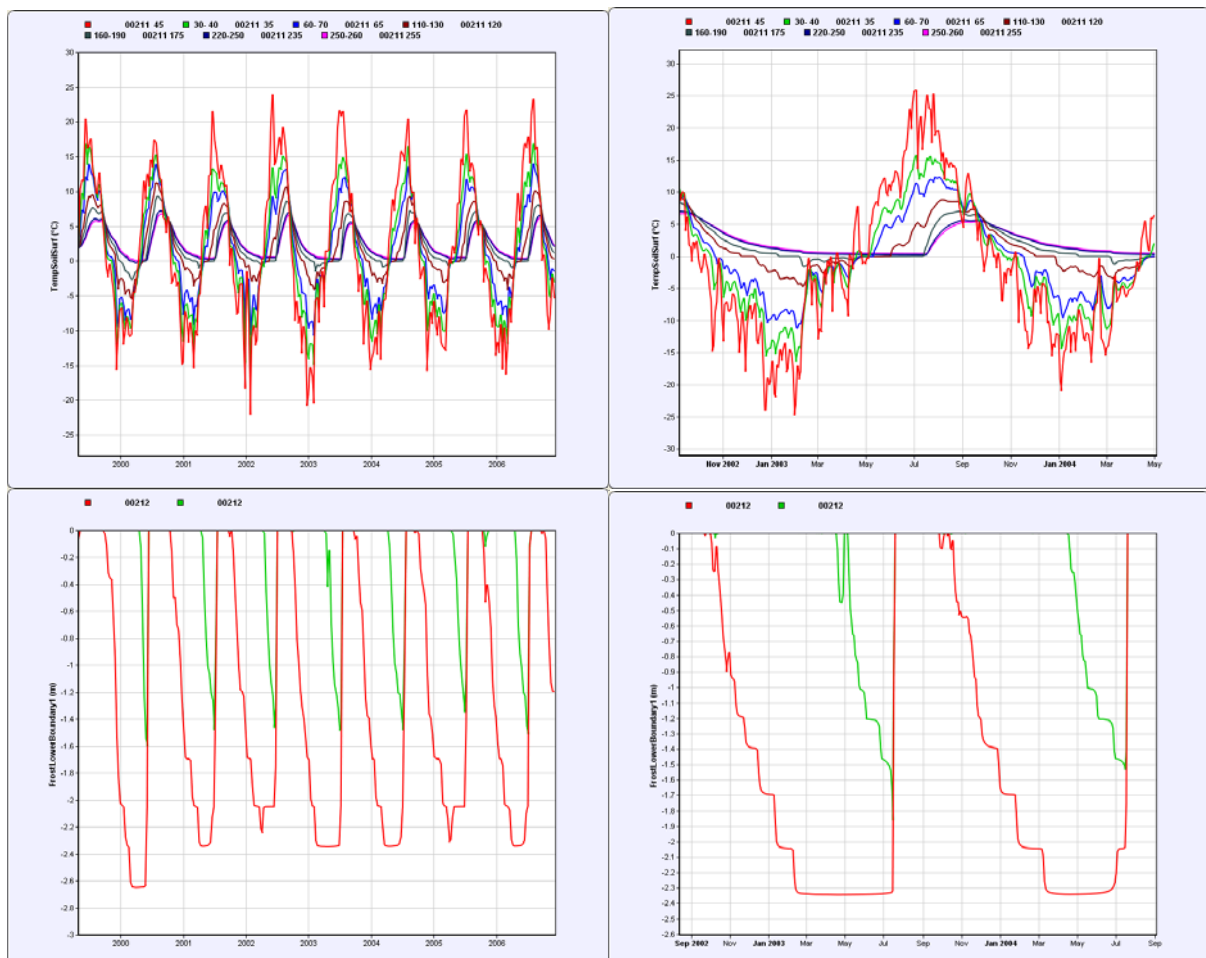
0-50_0-5



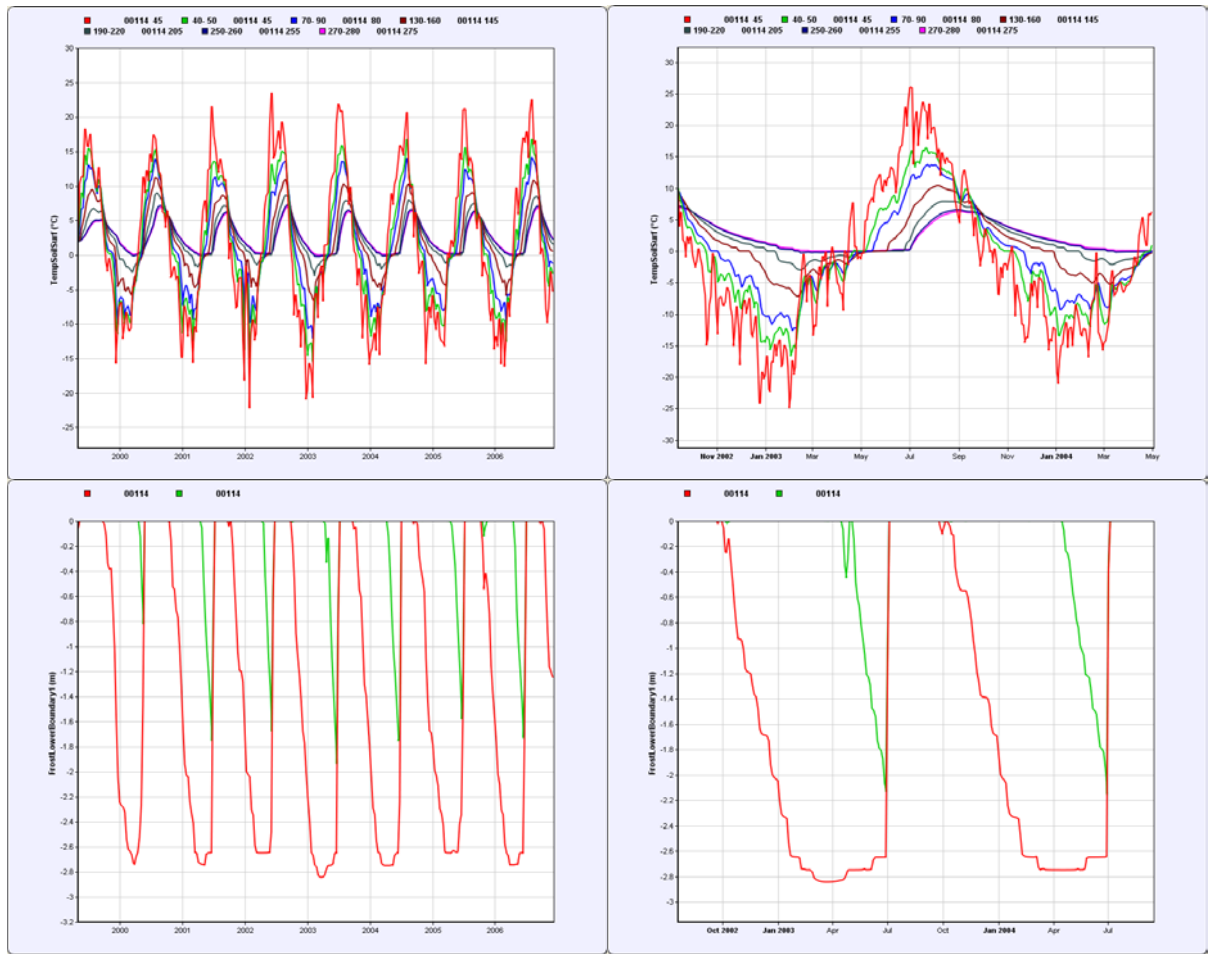
0-50_Subb



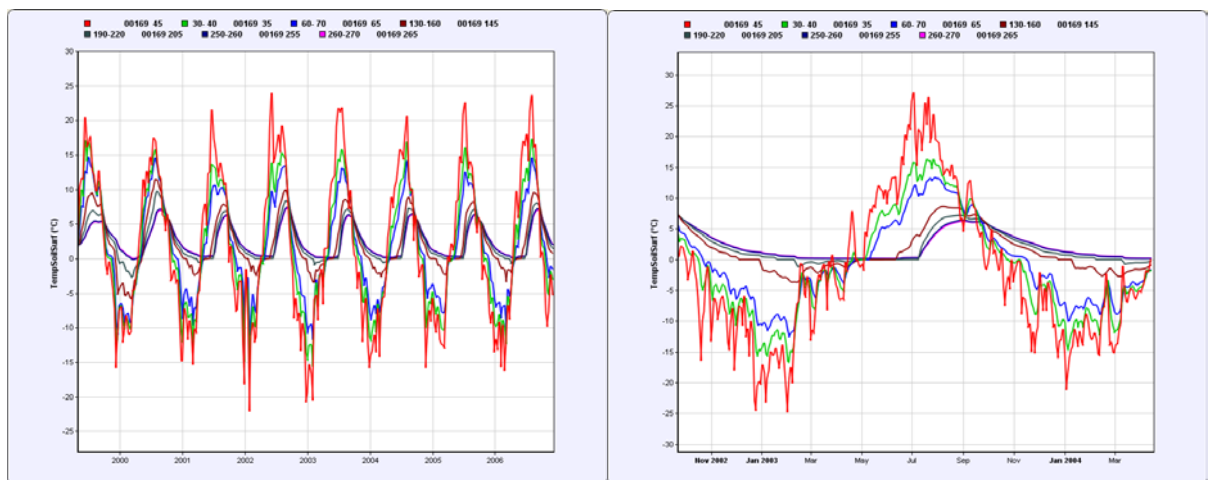
Vattenhalten i marken leder oss att döma ut 2001 som den djupaste tjälen, eftersom jorden på djupet 110 cm och djupare då ännu inte hunnit få en naturlig vattenhalt.

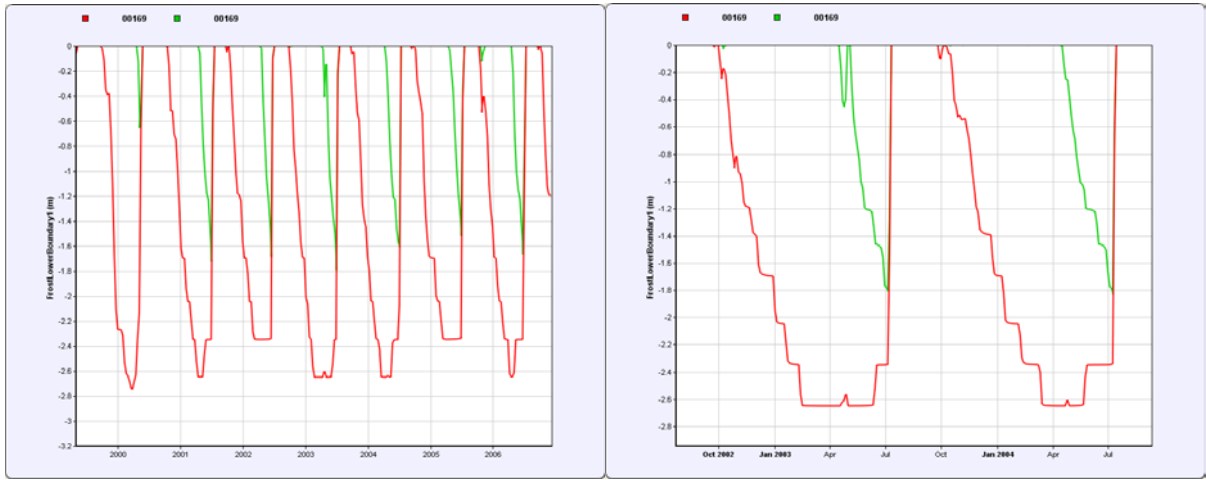


0-50_2,6m

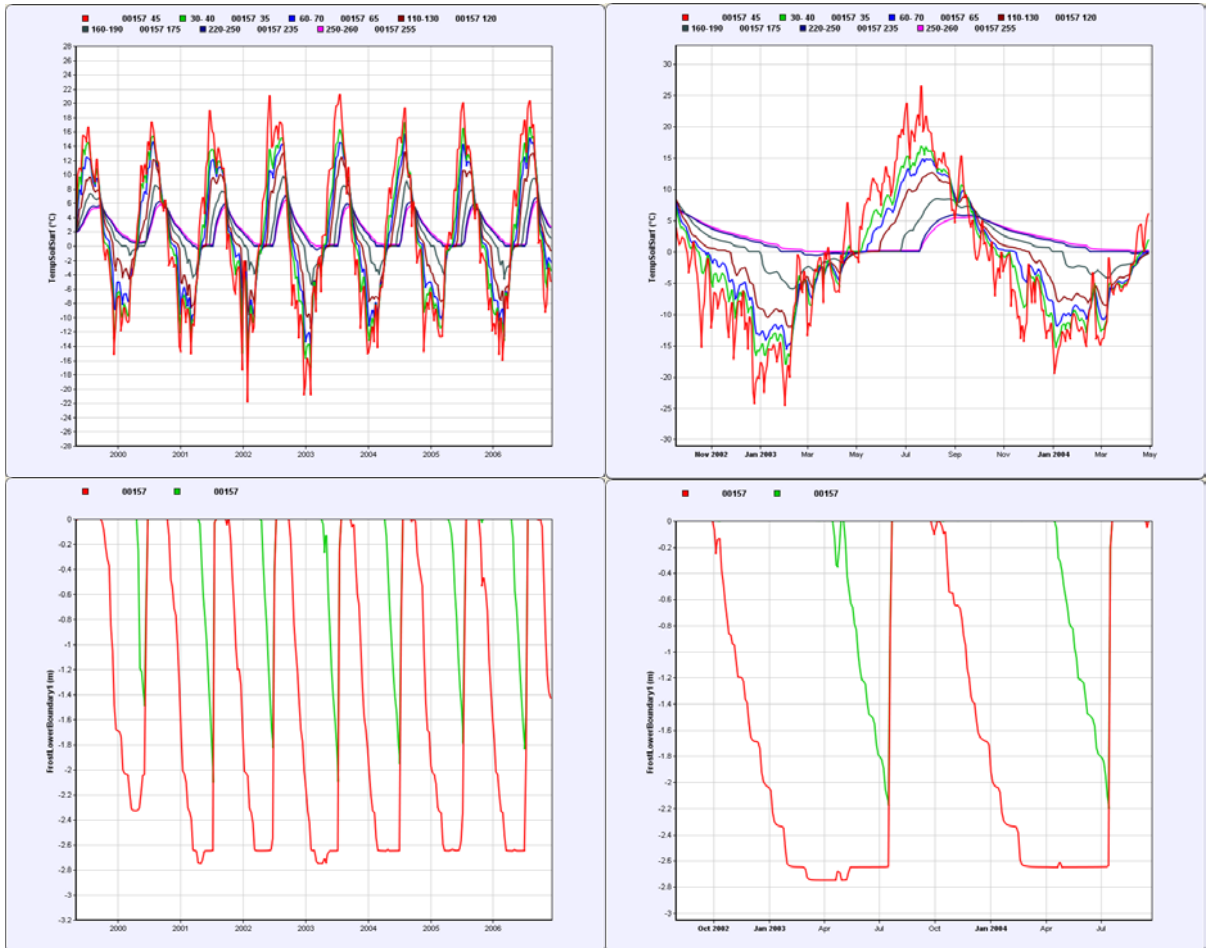


0-50_5-50

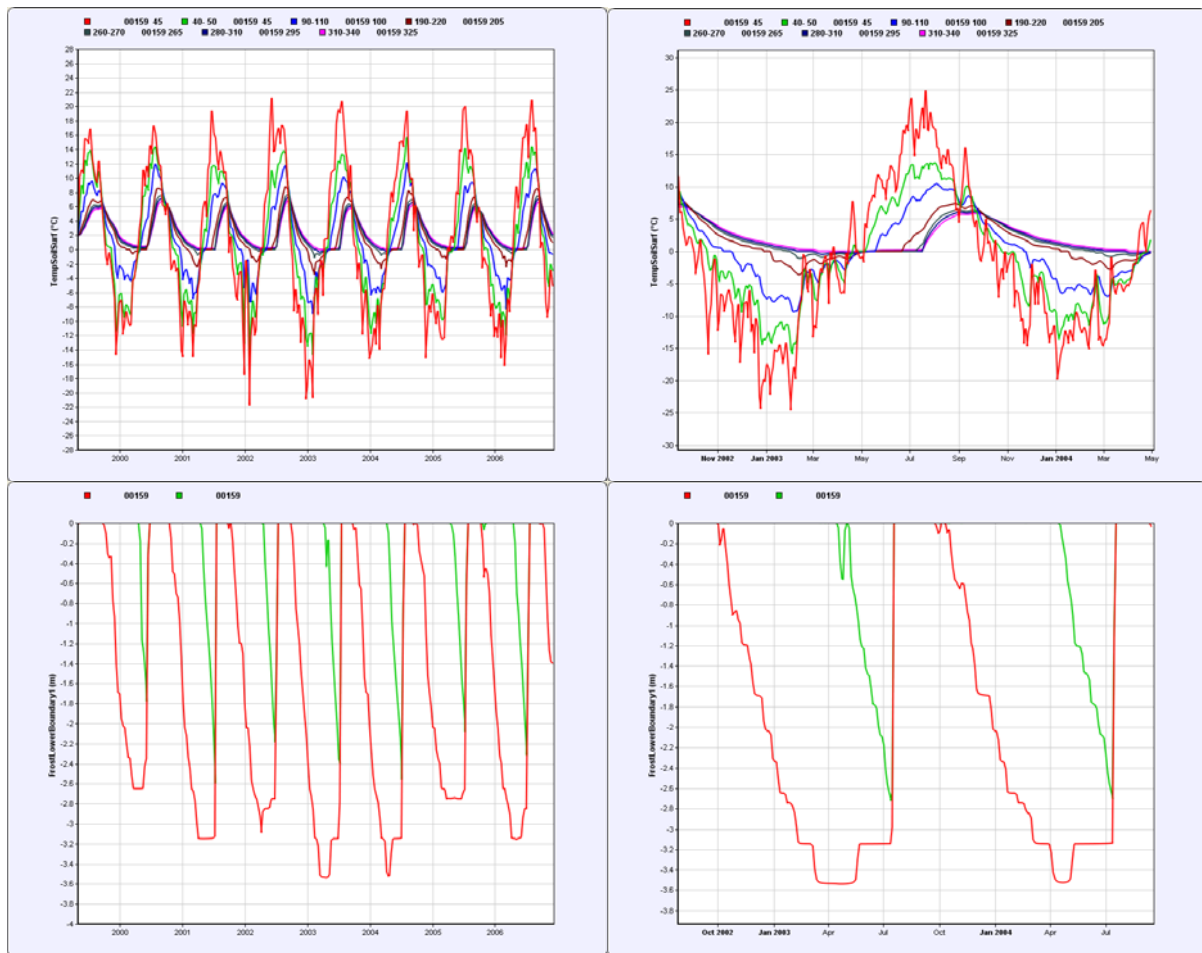




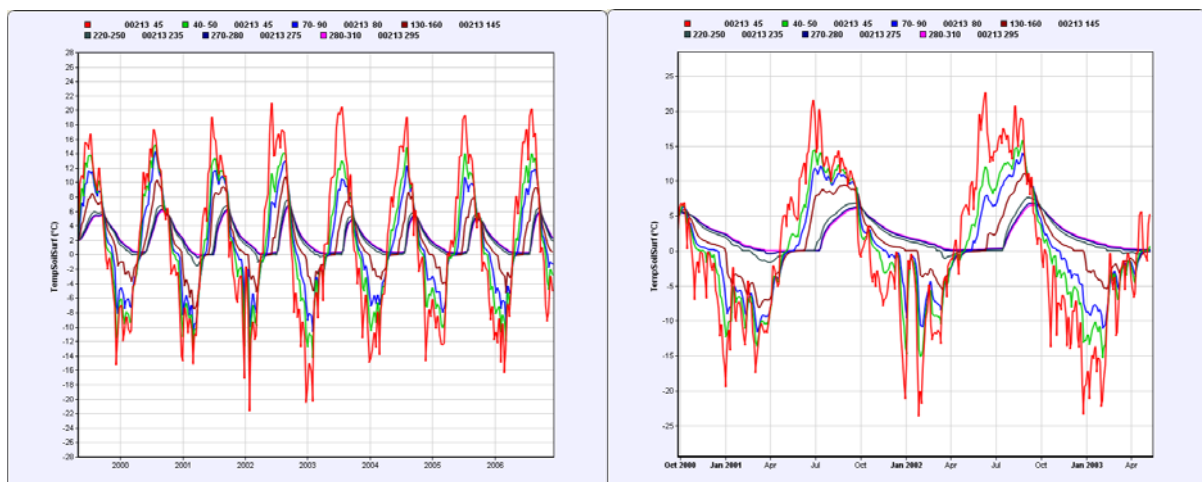
5-50_A-s

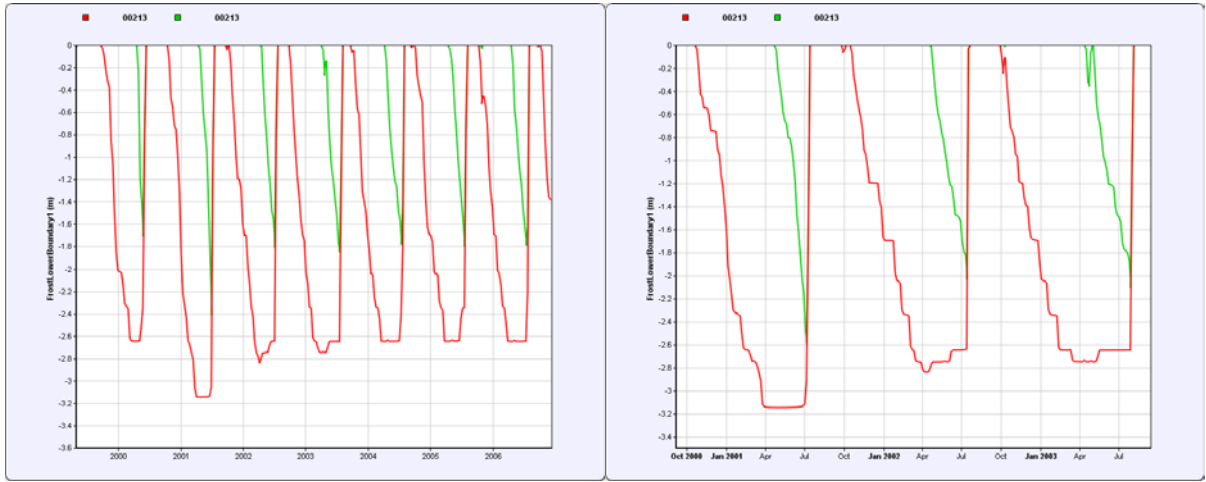


5-50_0-5

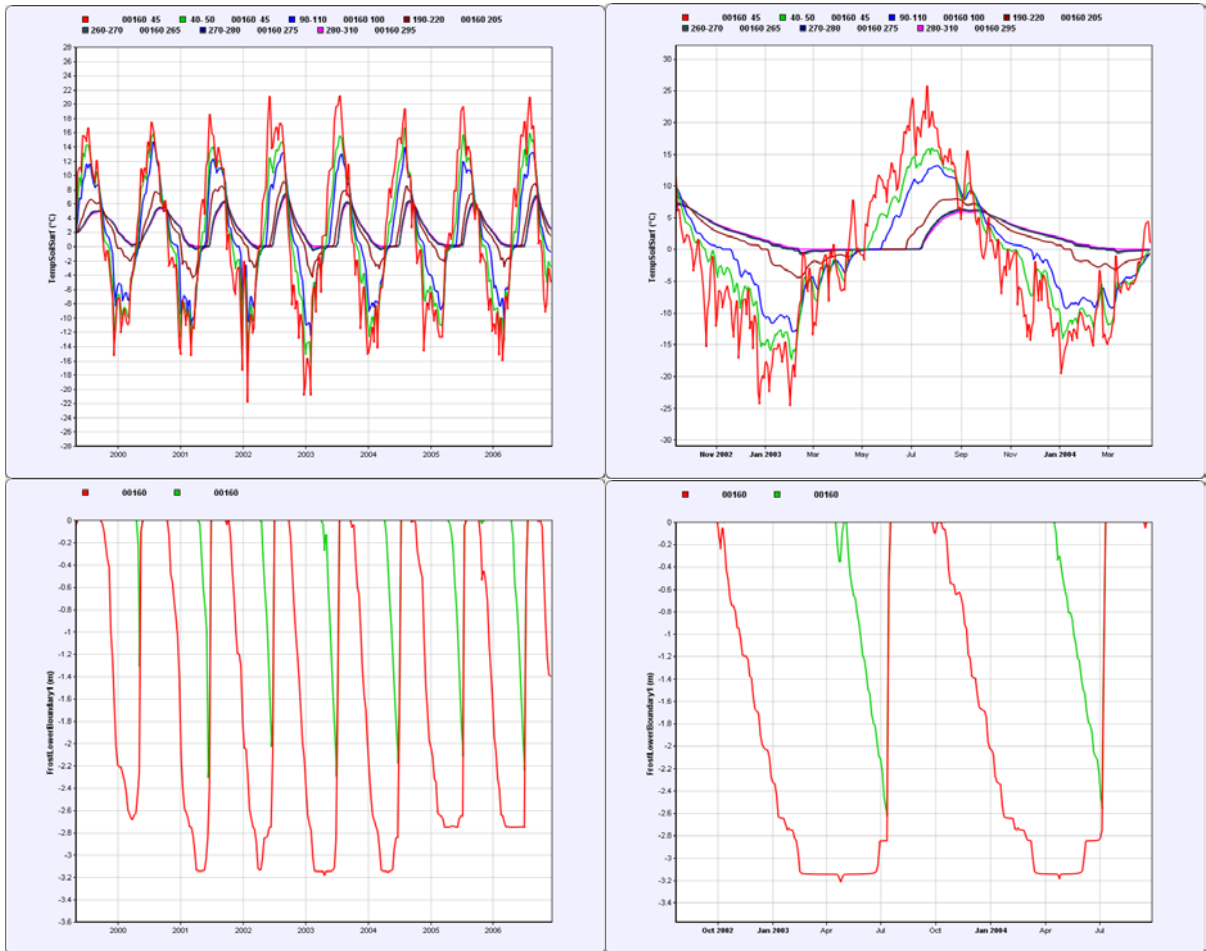


5-50_Subb

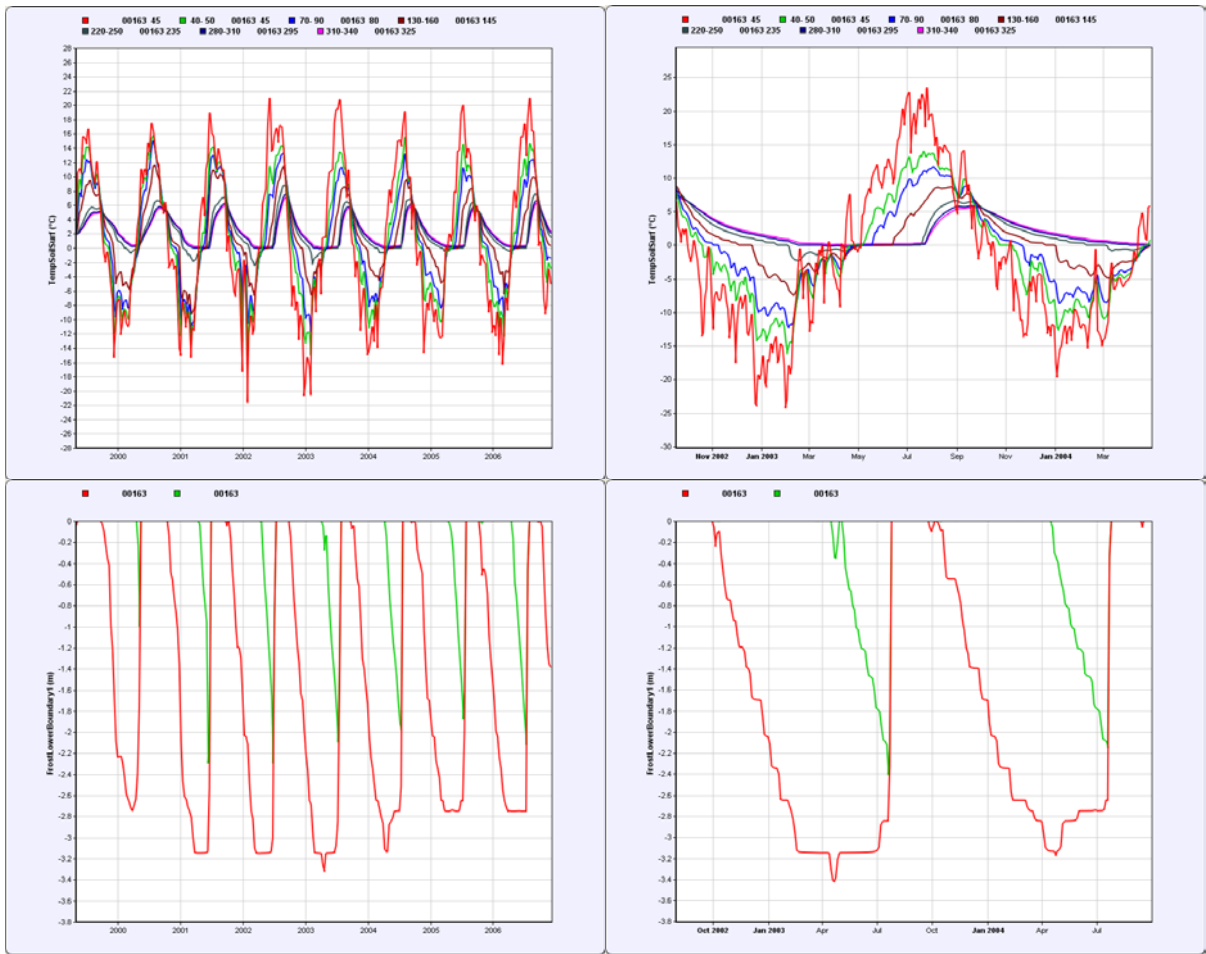




5-50_0-50



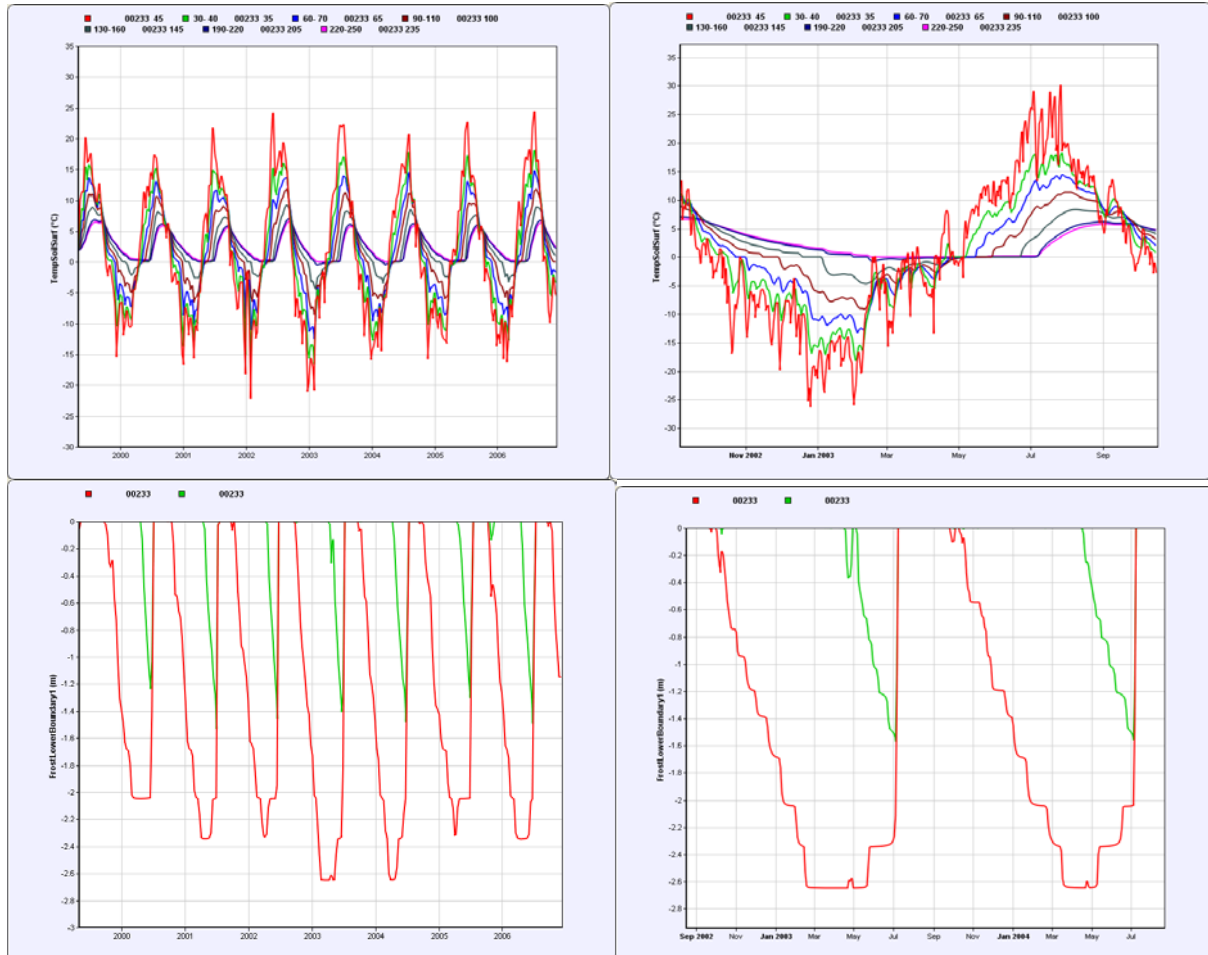
5-50_2,6m



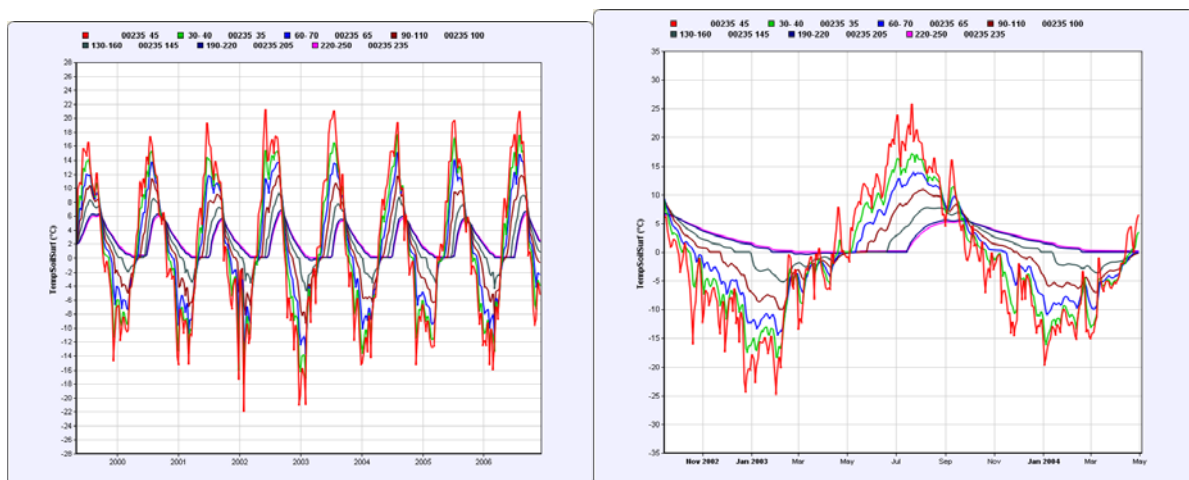
Bilaga 10 COUP-simuleringar av konstruktioner

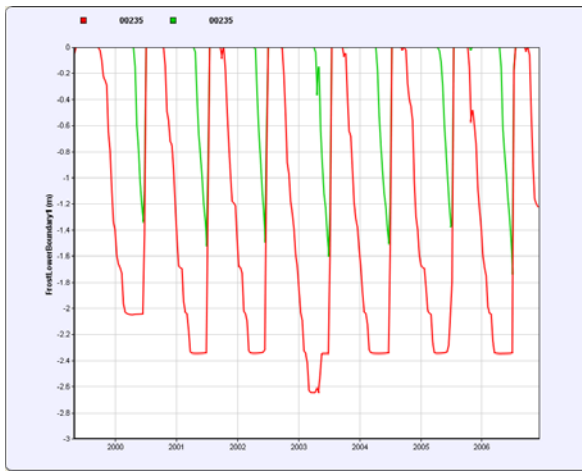
Konstruktion 1

Slänt:



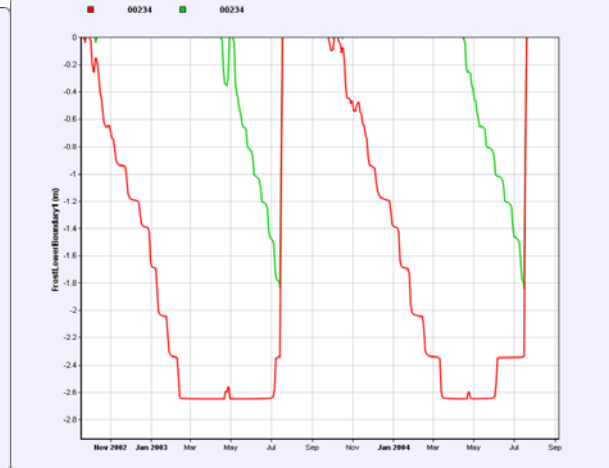
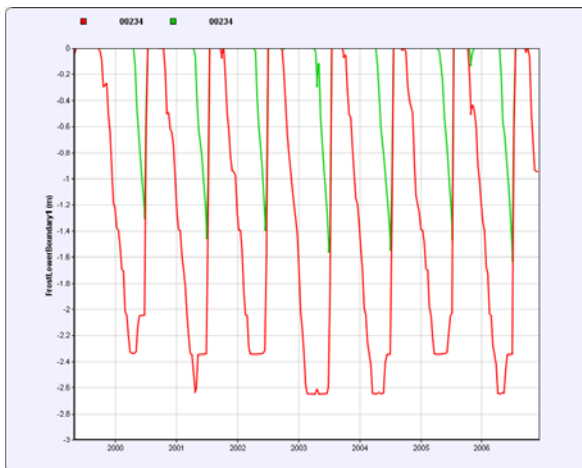
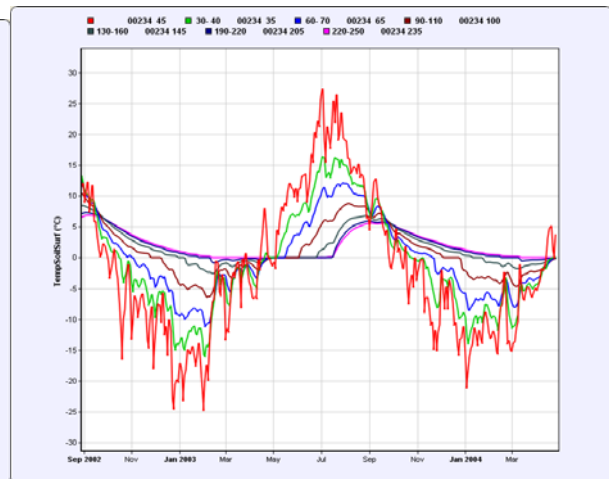
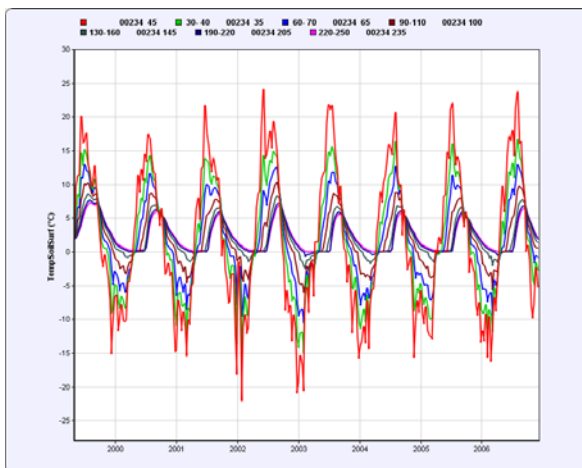
Krön:



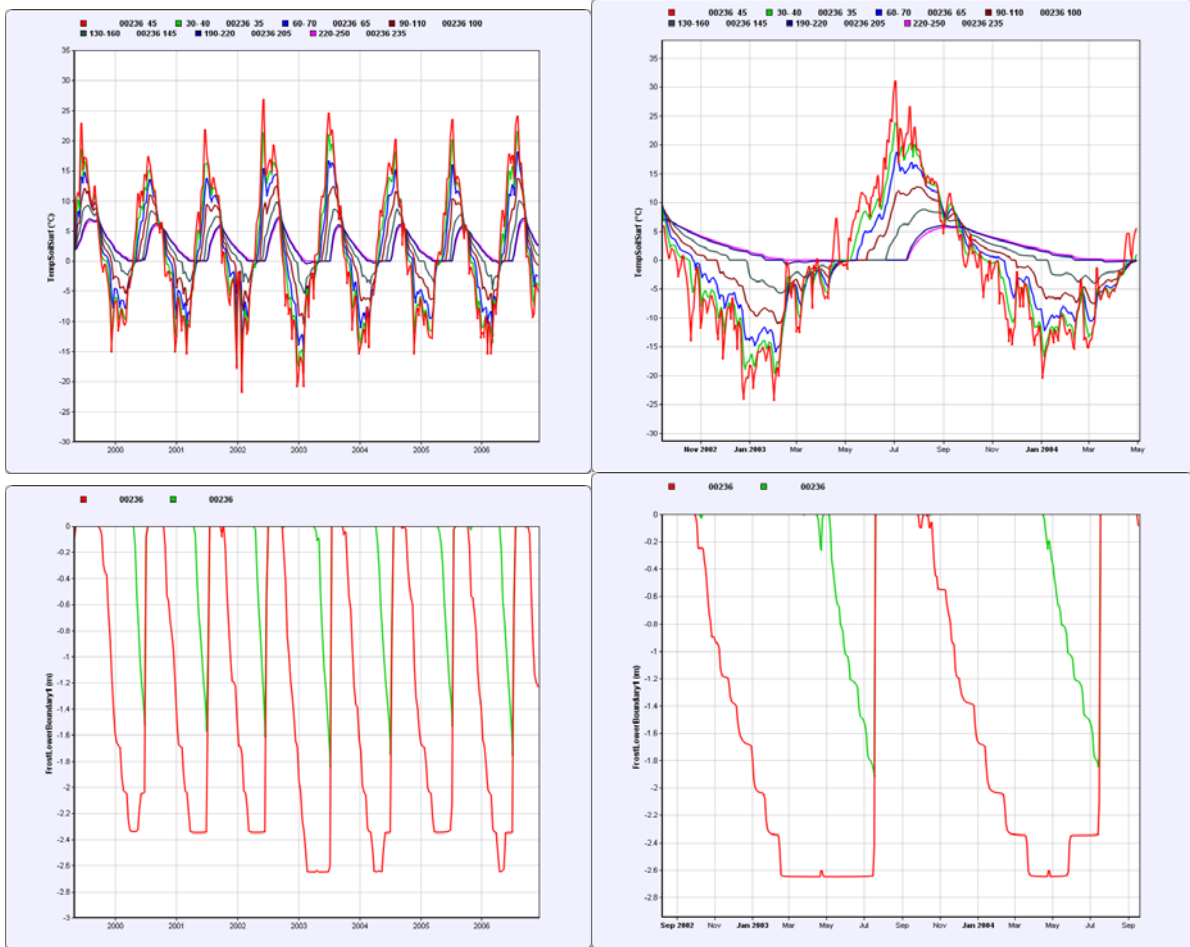


Konstruktion 2:

Slänt: 220 cm (fast mindre än 1:an)



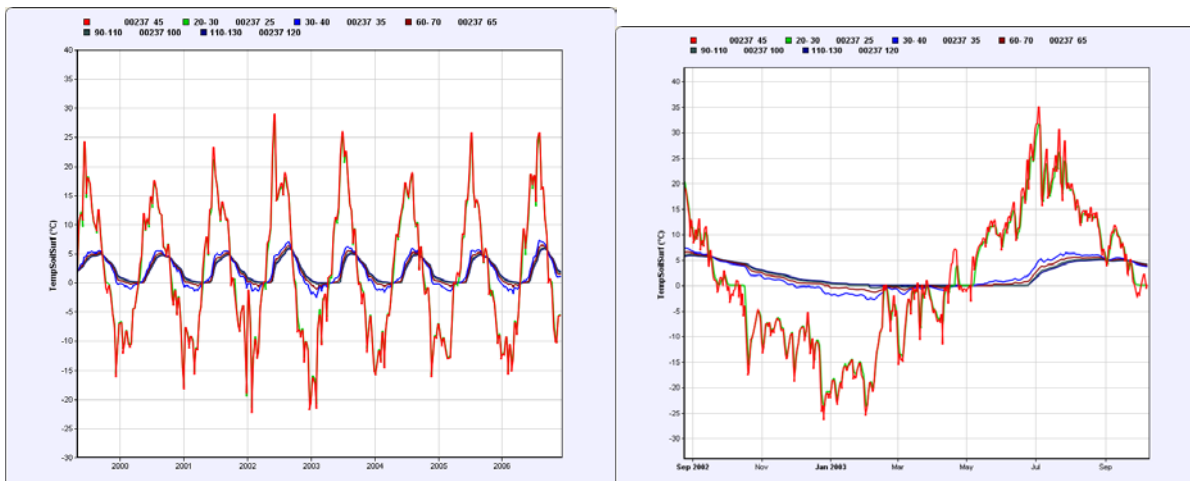
Krön:

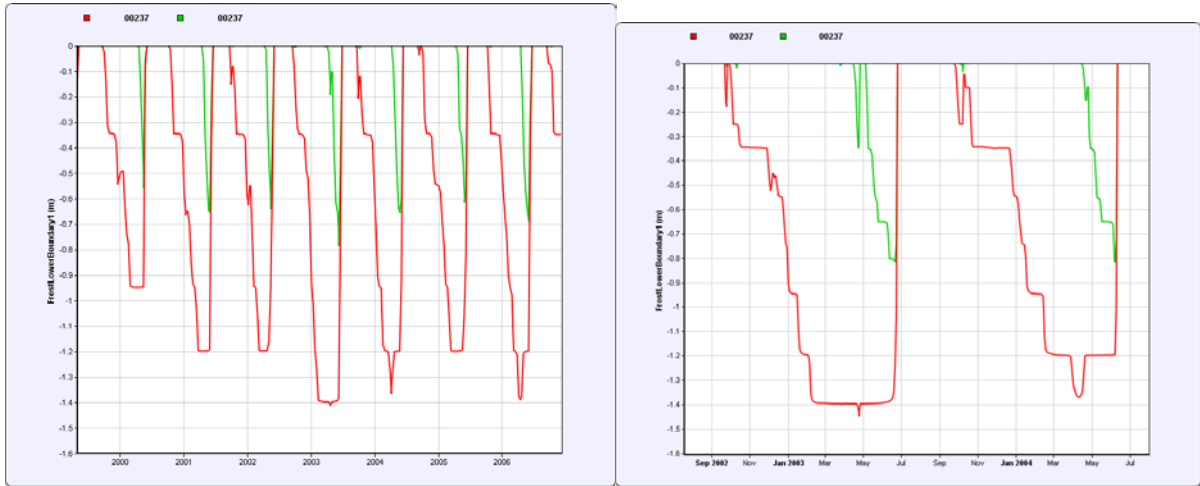


Konstruktion 3:

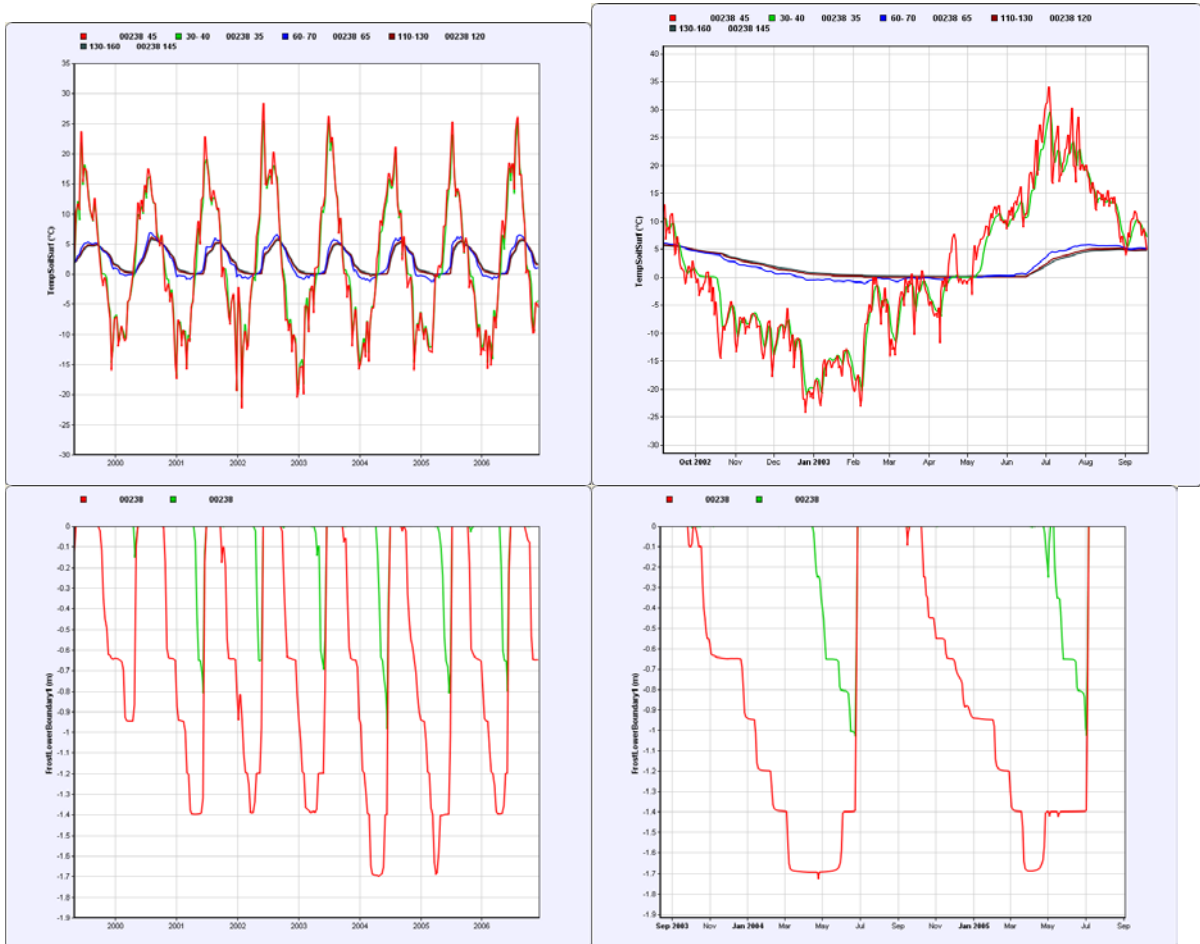
Markskivor:

Slänt:





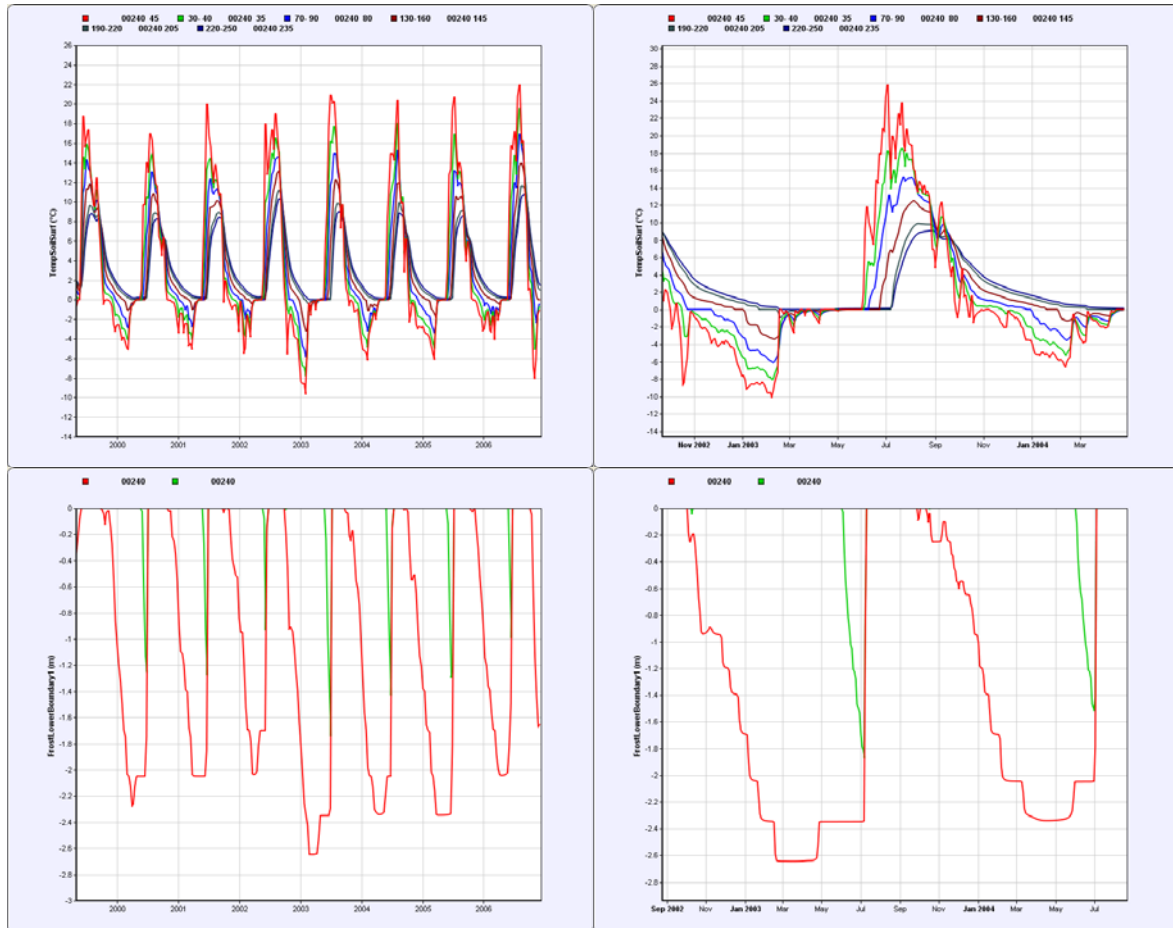
Krön:



Konstruktion 4:

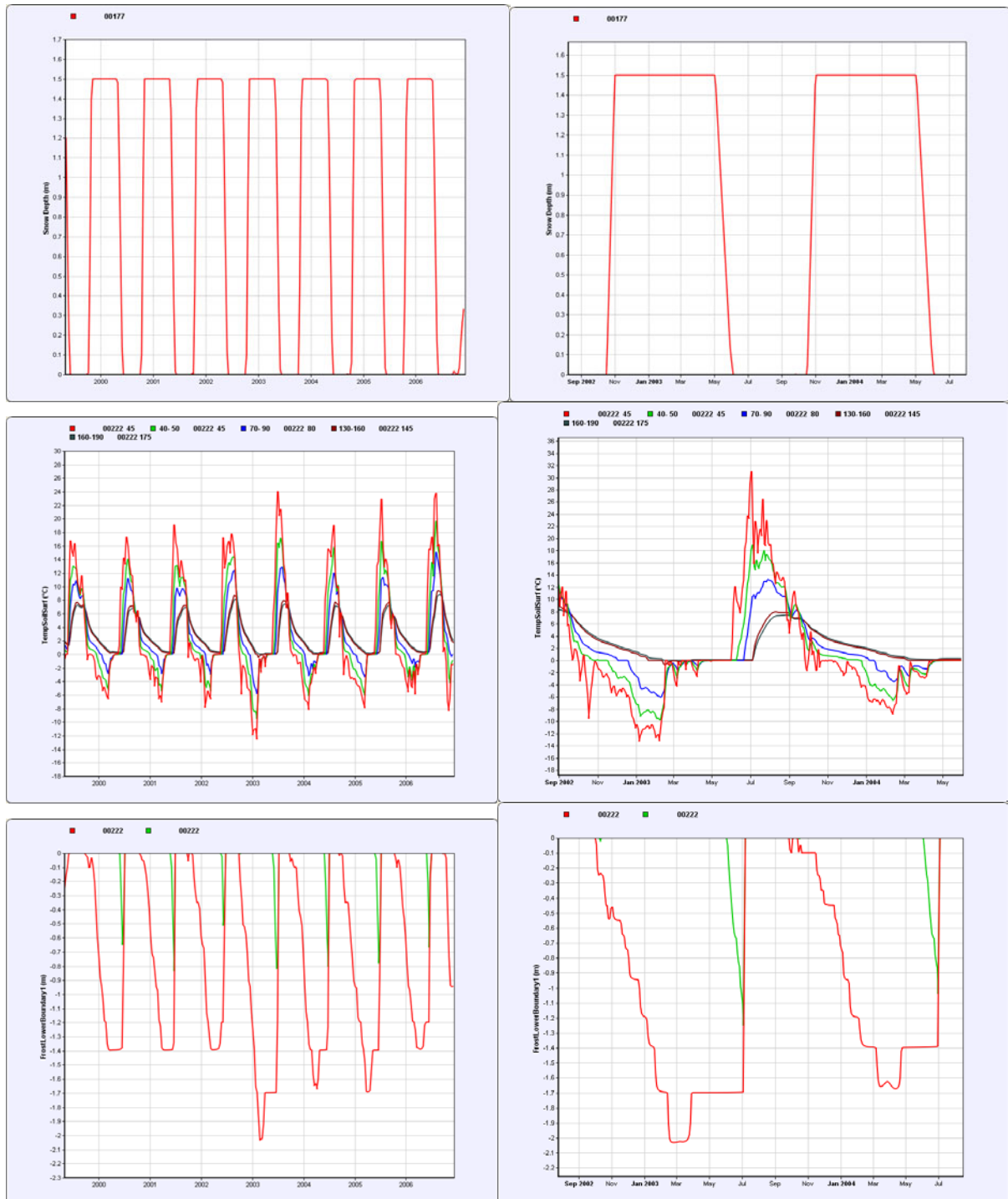
Snöfångare:

Slänt:



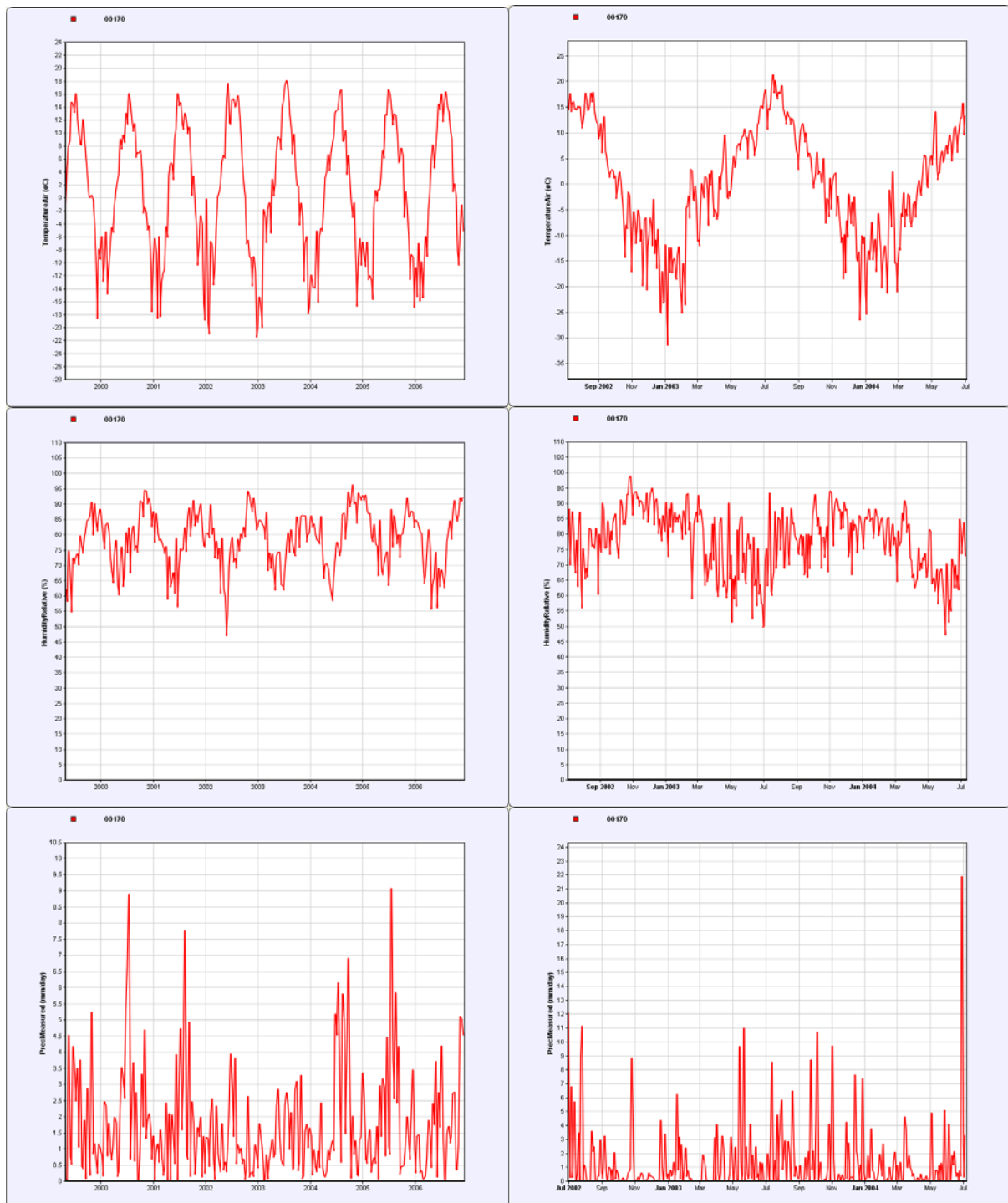
Krön:

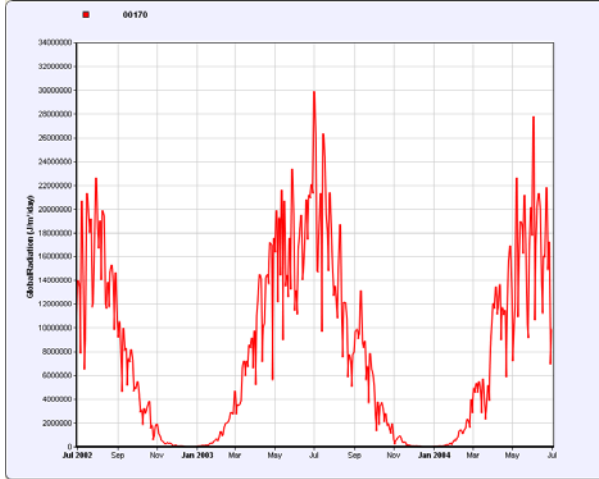
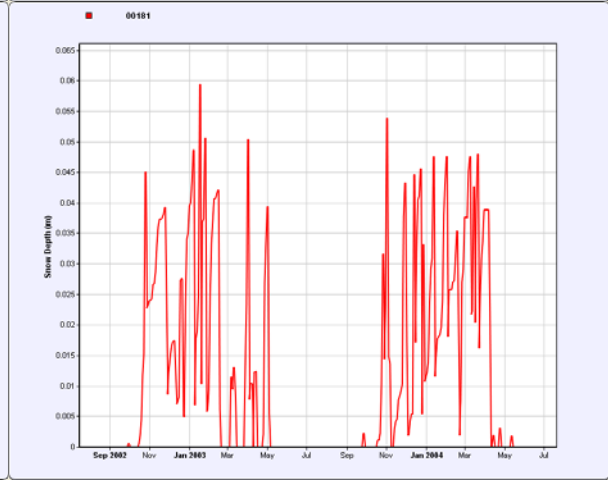
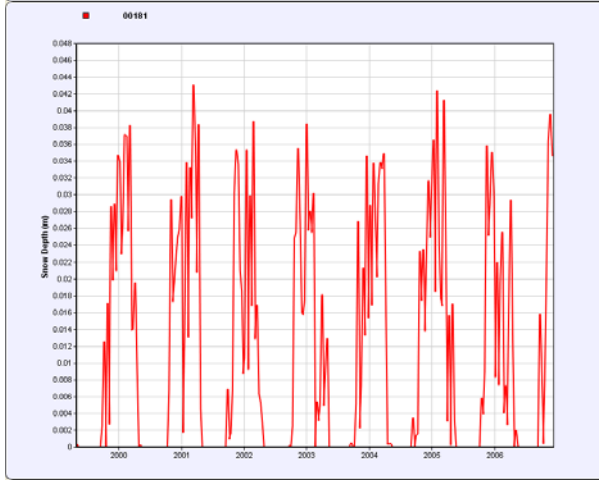
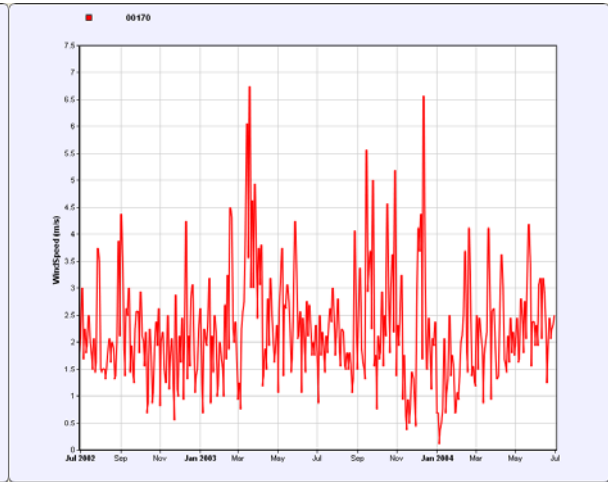
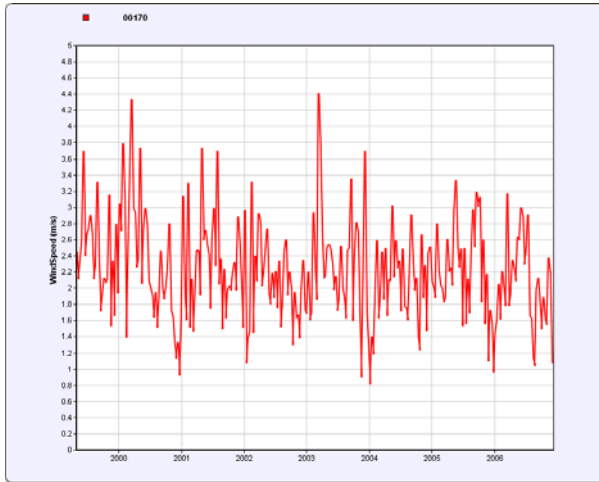
I bilderna kan man se att tjäldjupet varierar mycket mellan olika år med denna lösning. Vid tidig kyla tränger tjälen ner djupt vid vintern 2002. Ingen hänsyn till detta har tagits då snöfilen har skapats. Snödjupet är 1,5 m från 1 november varje höst, till 1 maj varje vår. Innan och efter sker korta perioder med övergång.

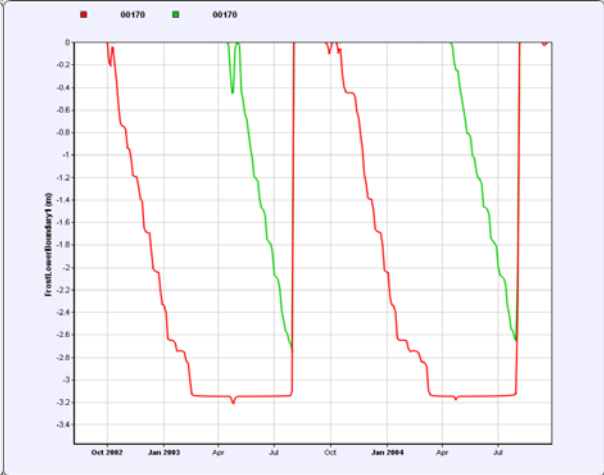
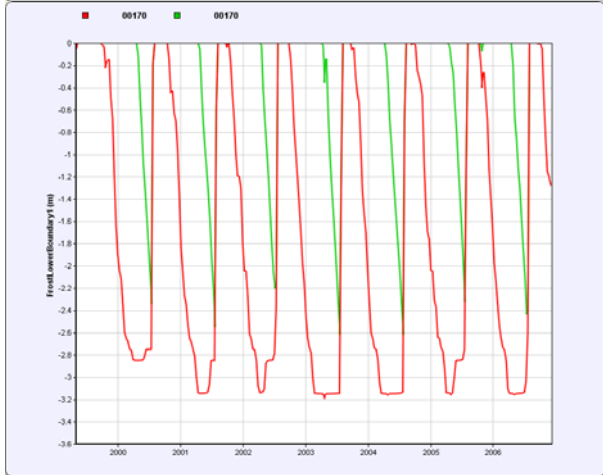
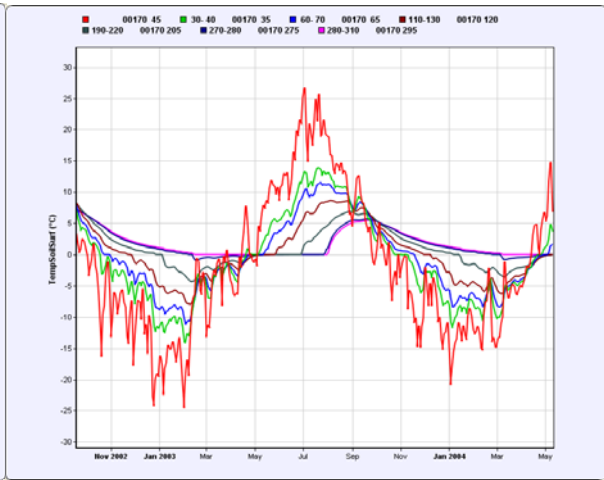
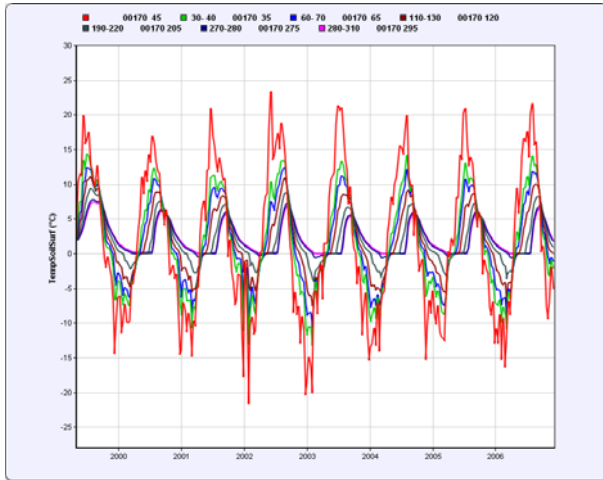


Referenssimulering:

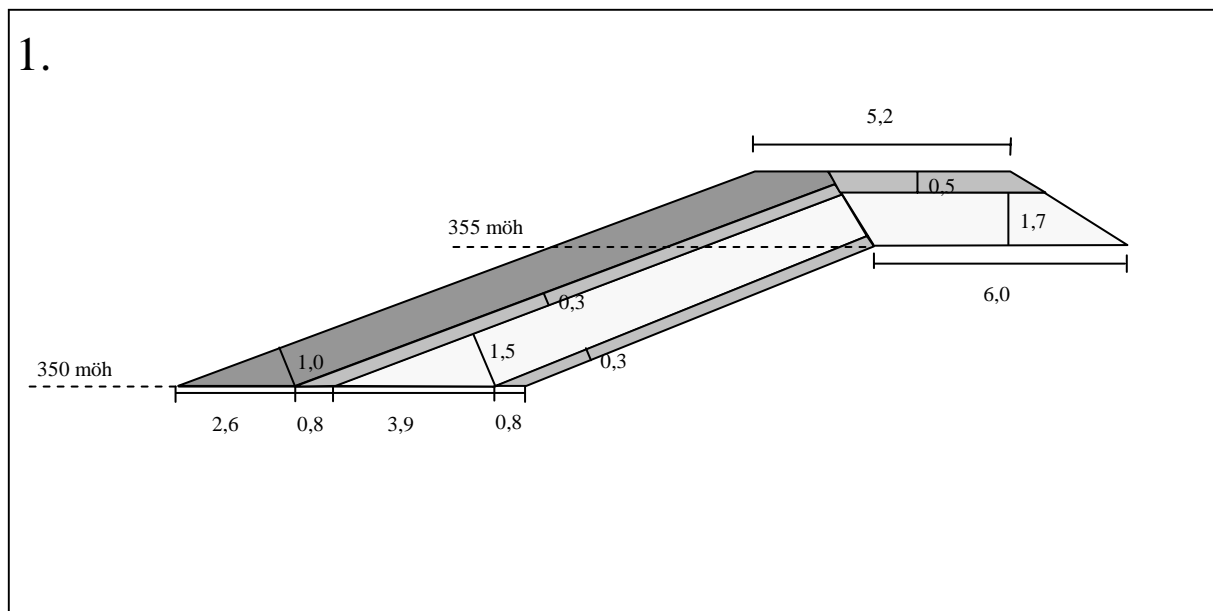
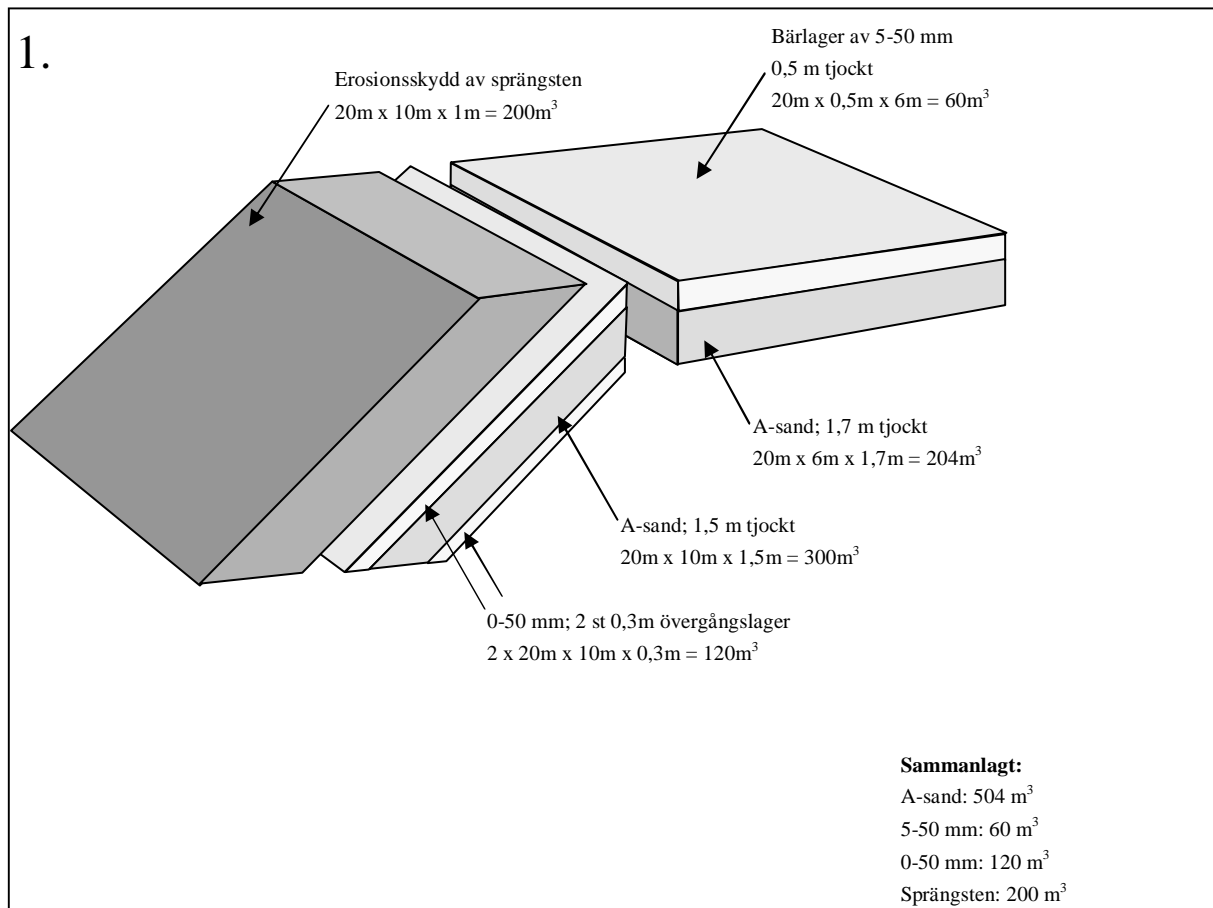
Referens 50 cm 0-50 mm över tätkärna och morän



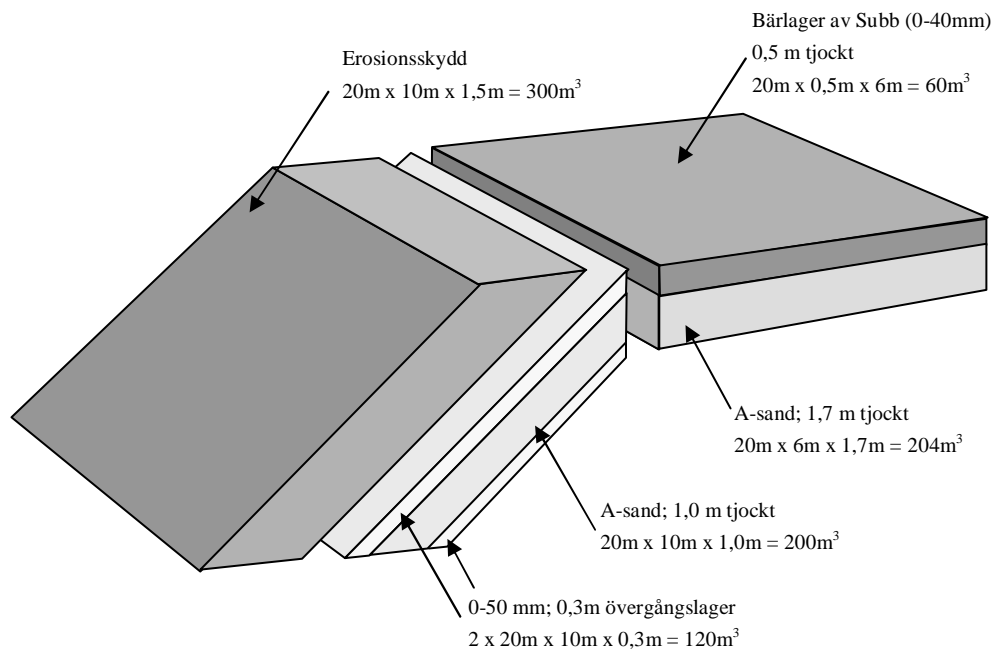




Bilaga 11 Konstruktionsutformning



2.



Sammanlagt:

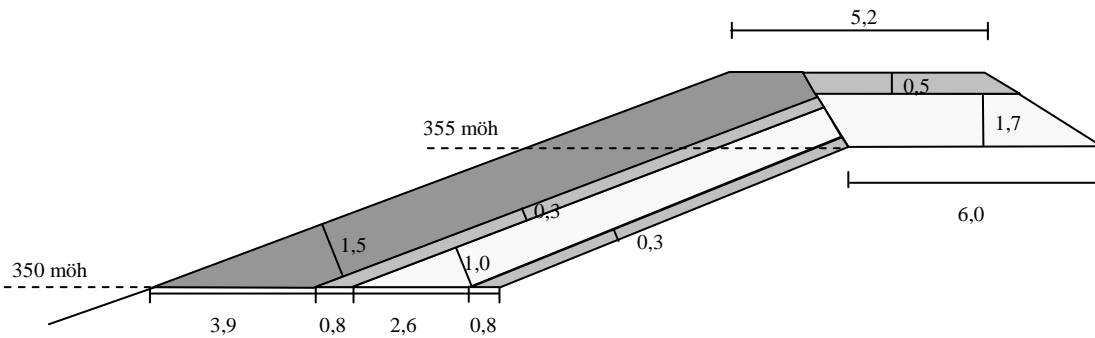
A-sand: 404m³

Subb: 60 m³

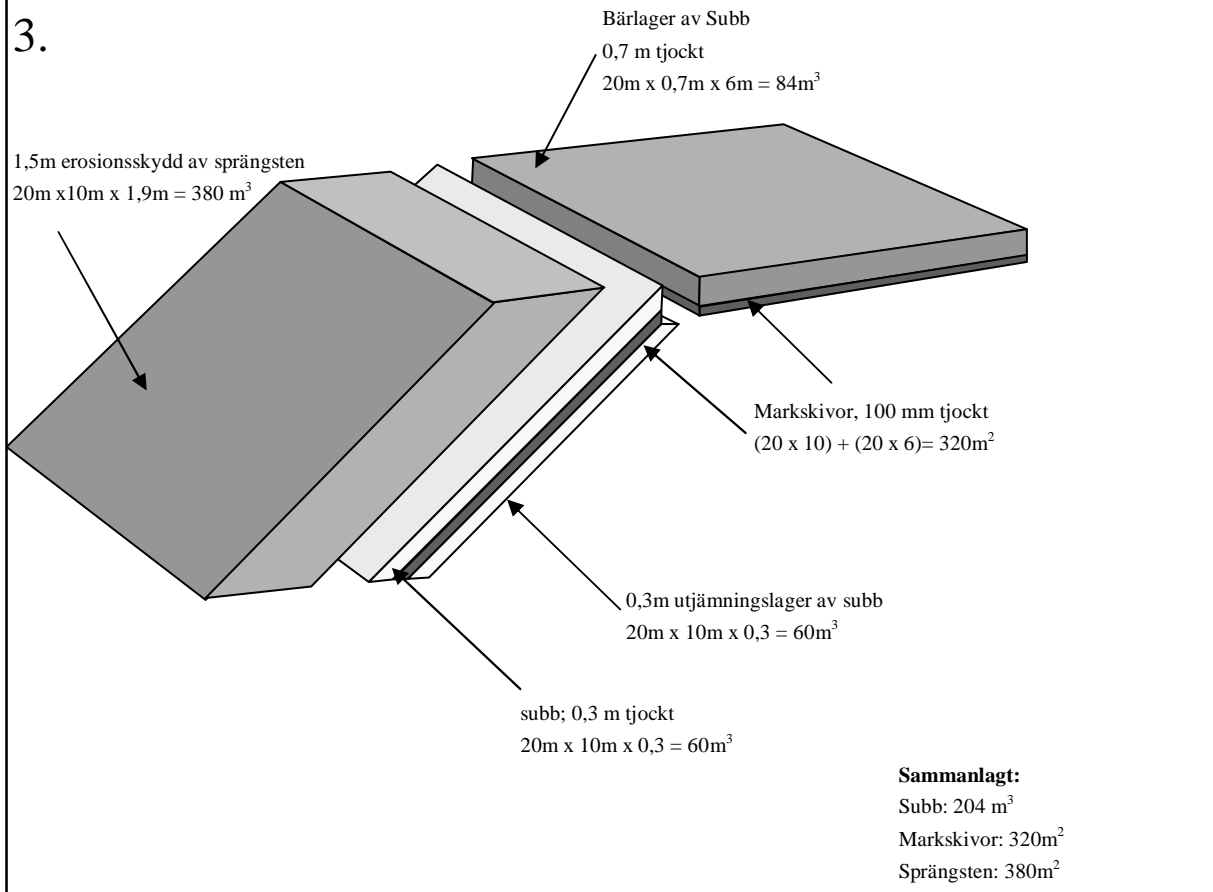
0-50 mm: 120 m³

Sprängsten: 300 m³

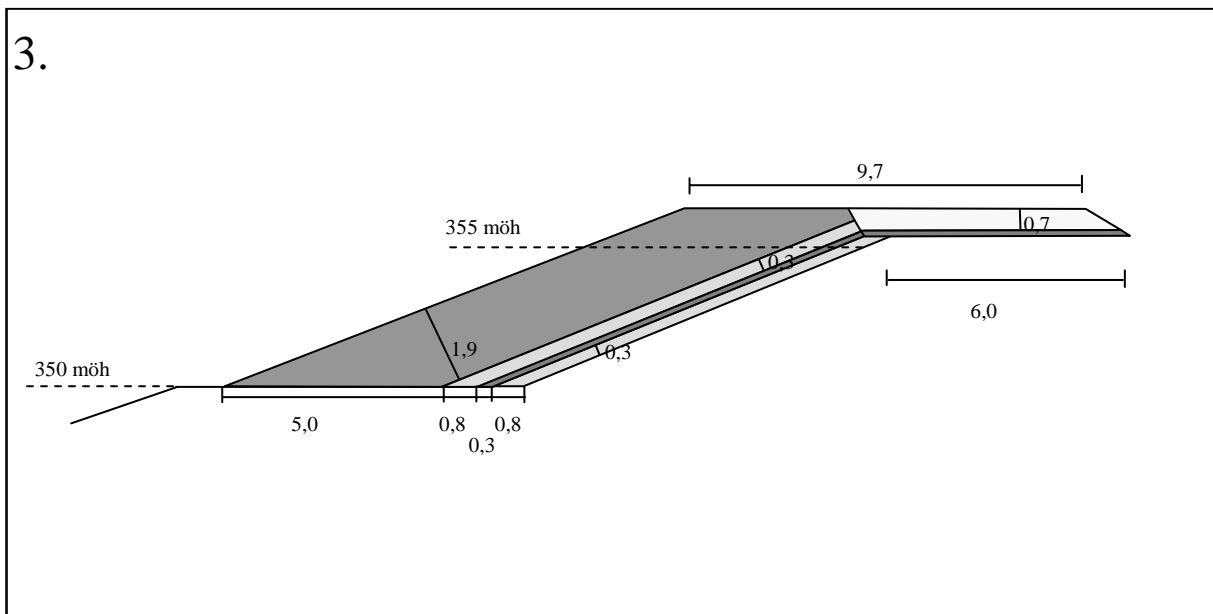
2.



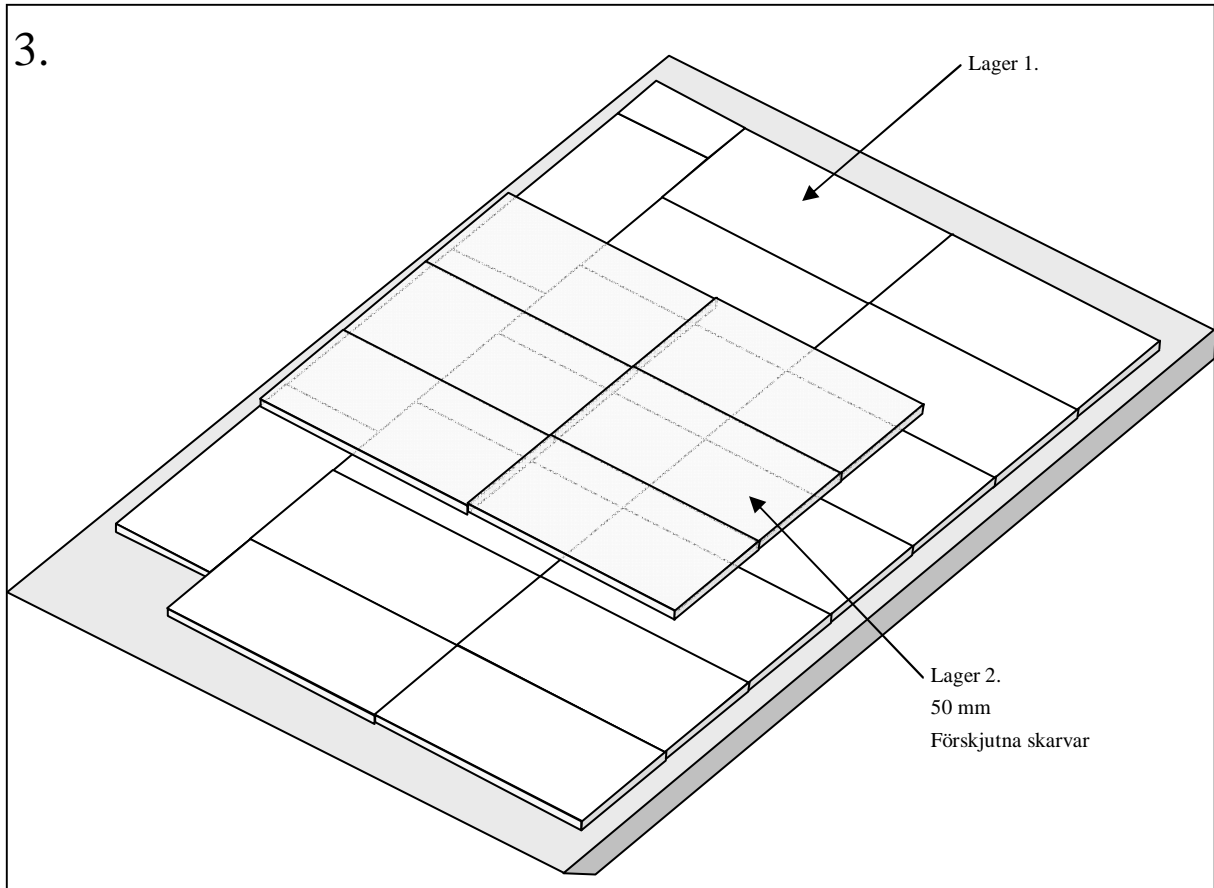
3.



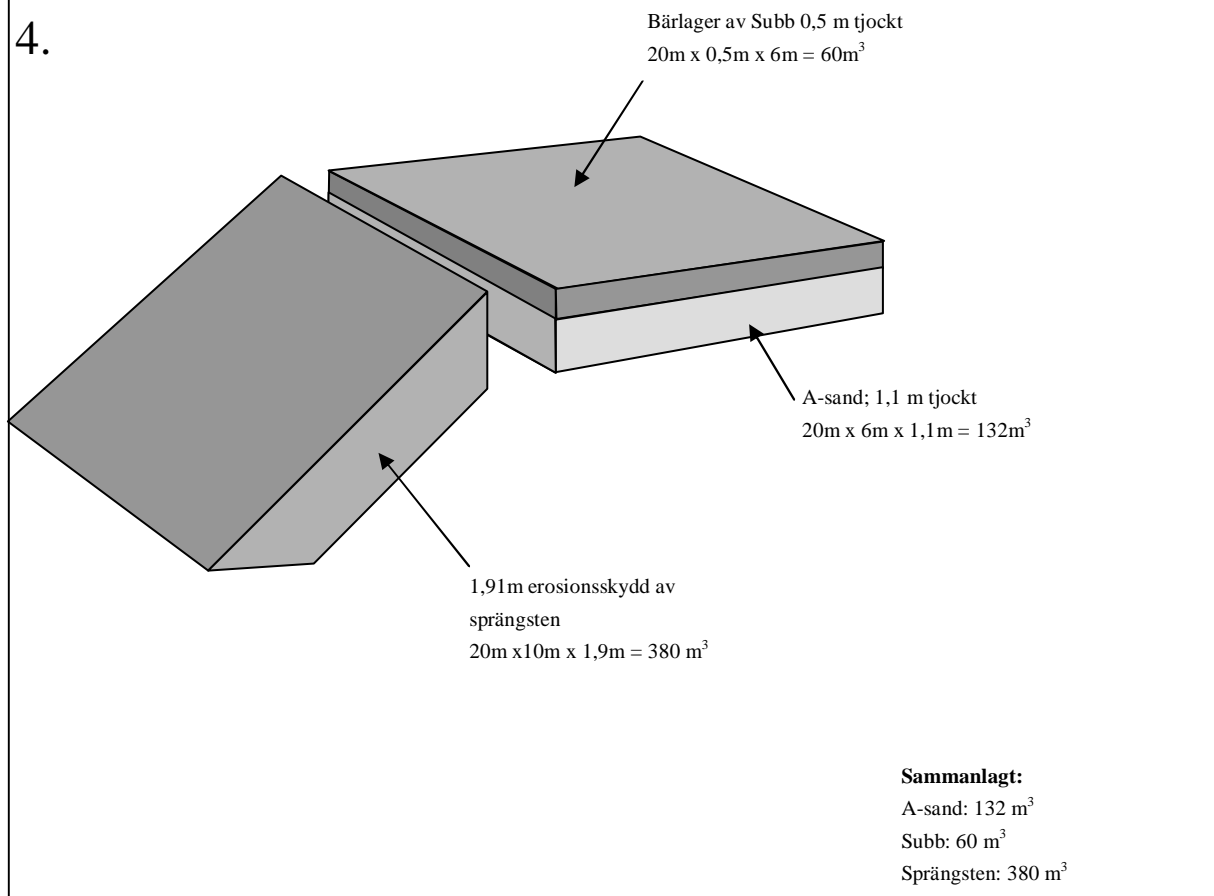
3.



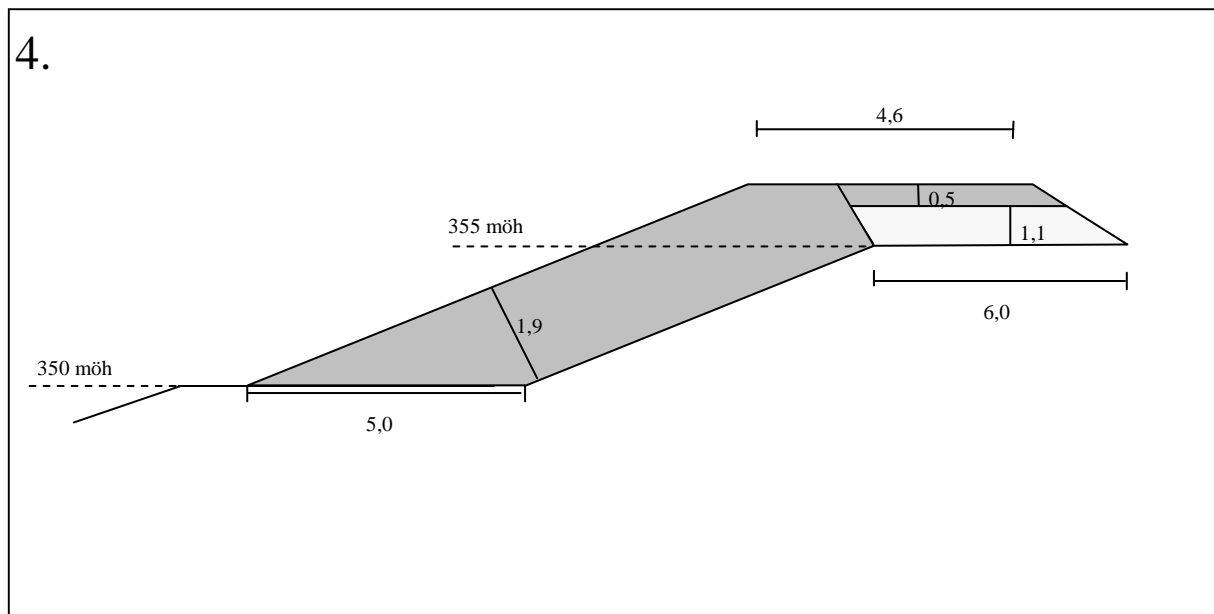
3.

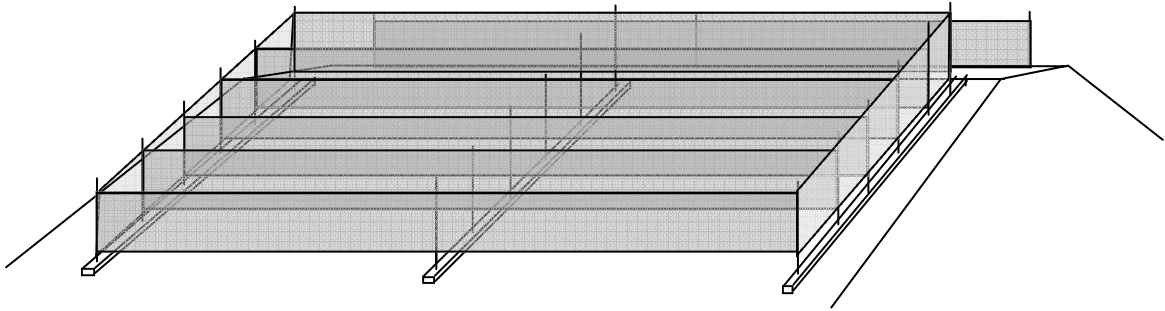
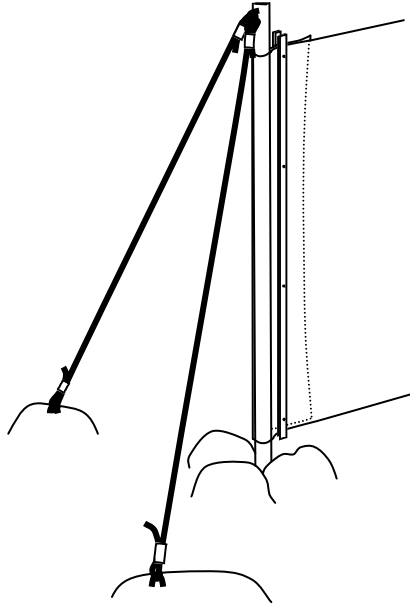
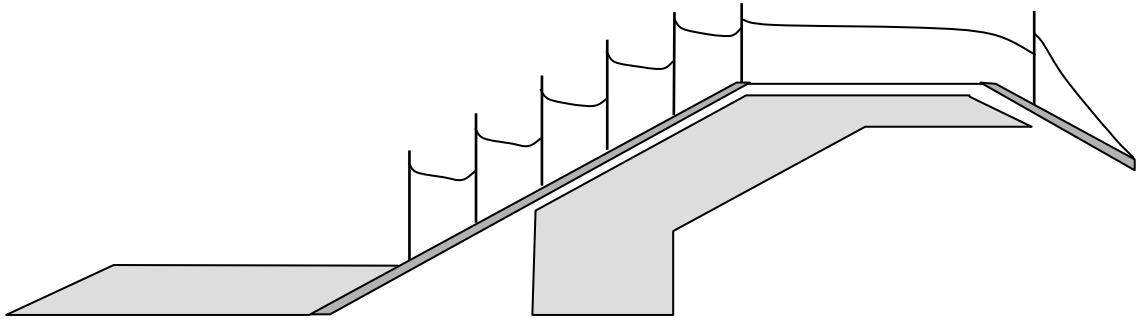


4.



4.





Bilaga 12 Kostnadsberäkningar

Konstruktion	Material	Mängd	Kostnad	Förklaring
1.				
Krön	A-sand: 1,7 m	18360 m ³	Lastbil: 281750 Lastare: 37730 Grävare: 37730 → 356980 kr	1224 lass → 490 h för 10 lastbilar → Byggtid: 49 h + 1 grävmaskin och 1 lastare
	5-50 mm: 0,5 m (bärlager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 102060 Lastning: 28350 Grävare: 18480 → 286890 kr	360 lass → 24 timmar för 10 lastbilar 1,5 ton/m ³ → 8100 ton (12,6 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
Slänt	0-50 mm: 0,3 m (övergångslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 367200 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 555810 kr	360 lass → 2,4 dagar för 10 lastbilar 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (40 kr/ton) + lastning 3,50 kr/ton +1 grävare
	A-sand: 1,5 m	27000 m ³	Lastbil: 414000 Lastare: 55440 Grävare: 55440 → 524880 kr	1800 lass → 720 h totalt för 10 lastbilar → byggtid: 72 h + 1 grävmaskin och 1 lastare
	0-50 mm: 0,3 m (övergångslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 367200 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 555810 kr	360 lass → 2,4 dagar för 10 lastbilar 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (40 kr/ton) + lastning 3,50 kr/ton +1 grävare
	Sprängsten 1,0m (erosionsskydd)	18000 m ³	Lastbil: 530725 Lastare: 71071 Grävare: 71071 → 672867	1200 lass → 923 h för 10 lastbilar → Byggtid: 92,3h +1 lastare +1 grävare
				Tot: 2 953 237

2.	Material	Mängd	Kostnad	Förklaring
Krön	A-sand: 1,7 m	18360 m ³	Lastbil: 281750 Lastare: 37730 Grävare: 37730 → 356980 kr	1224 lass → 490 h för 10 lastbilar → Byggtid: 49 h + 1 grävmaskin och 1 lastare
	Subb 0-40 mm: 0,5 m (bärlager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 110160 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 298770 kr	360 lass → 240 timmar för 10 lastbilar → 24 h 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (12 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
Slänt	0-50 mm: 0,3 m (övergångslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 367200 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 555810 kr	360 lass → 2,4 dagar för 10 lastbilar 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (40 kr/ton) + lastning 3,50 kr/ton +1 grävare
	A-sand: 1,0 m	18000 m ³	Lastbil: 276000 Lastare: 36960 Grävare: 36960 → 349920 kr	1200 lass → 480 h totalt för 10 lastbilar → byggtid: 48 h + 1 grävmaskin och 1 lastare
	0-50 mm: 0,3 m (övergångslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 367200 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 555810 kr	360 lass → 240 timmar totalt för 10 lastbilar. 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (40 kr/ton) + lastning 3,50 kr/ton +1 grävare
	Sprängsten 1,5m (erosionsskydd)	27000 m ³	Lastbil: 796154 Lastare: 106645 Grävare: 106645 → 1009444	1800 lass → 1385 h totalt för 10 lastbilar → Byggtid: 138,5h +1 lastare +1 grävare
				Totalt: 3126734

3.	Material	Mängd	Kostnad	Förklaring
Krön	Isoleringsskivor: 100 mm (styrofoam, fasade kanter)	10800 m ²	Materialkostnad: 1926720 Arbetskostnad: 100800 → 2027520	178,40 kr/m ² Utläggning: 288 arbetstimmar
	Subb 0-40 mm: 0,7 m	7560 m ³	Lastbil: 193200 Materialpris: 154224 Lastning: 44982 Grävare: 25872 → 418278 kr	504 lass → 336 timmar totalt för 10 lastbilar → Byggtid: 33,6 h 1,7 ton/m ³ → 12852 ton (12 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
Slänt	subb: 0,3 m (utjämningslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 110160 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 298770 kr	360 lass → 240 timmar för 10 lastbilar → 24 h 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (12 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
	Isoleringsskivor: 2x50 mm (cellplast)	18000 m ²	Materialpris: 1830600 Arbetskostnad: 252000 → 2082600	101,70 kr/m ² (med dubbla 50 mm lager) Utläggning: 720 arbetstimmar
	Subb: 0,3 m (hållbarhetslager)	5400 m ³	Lastbil: 138000 Materialpris: 110160 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 298770 kr	360 lass → 240 timmar för 10 lastbilar → 24 h 1,7 ton/m ³ → 9180 ton (12 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
	Sprängsten 1,9m	34200 m ³	Lastbil: 1008550 Lastare: 135046 Grävare: 135046 → 1278642	2280 lass → 1754 h totalt för 10 lastbilar → Byggtid: 175,4h +1 lastare +1 grävare
			Totalt: 6404580	

4.	Material	Mängd	Kostnad	Förklaring
Krön	A-sand: 1,1 m	11880 m ³	Transport: 182160 Lastare: 24409 Grävare: 24409 → 230978 kr	792 lass → 317 h för 10 lastbilar → Byggtid: 31,7 h + 1 grävmaskin och 1 lastare
	Subb: 0,5 m	5400 m ³	Transport: 138000 Materialpris: 110160 Lastning: 32130 Grävare: 18480 → 298770 kr	360 lass → 240 timmar totalt för 10 lastbilar → Byggtid: 24 h 1,7 ton/m ³ → 12852 ton (12 kr/ton), lastning (3,50 kr/ton) + 1 grävare
Slänt	Sprängsten 1,9m	34200 m ³	Lastbil: 1008550 Lastare: 135046 Grävare: 135046 → 1278642	2280 lass → 1754 h totalt för 10 lastbilar → Byggtid: 175,4h +1 lastare +1 grävare
	Snöfångare:	8126	Stolpar: 228060 Vajer: 41847 Stolpmaterial: 138106 Nätmaterial: 20000 Snönät: 537624 Montering: 303800 Grävmaskin: 41811 → 1311248	3258 m stolpe (70 kr/m) 7240 m vajer (5,78 kr/m) Stopmaterial och nätmaterial: se nedan Snönät: 21600m ² (24,89 kr/m ²) Totalt 724 monterings-timmar Grävmaskin: 3 min/stolpe → 54,3 h
			Totalt: 3103386	

Uträkningarna baseras på följande antaganden:

- A-sand lastas i sandmagasinet med lastare (770 kr/h) till lastbilar (550 kr/h) eller dumpers (600 kr/h). Dessa maskiner rymmer båda 15 m³ i flaket. Avståndet till damm I-J gör att bilarna hinner ca 25 lass per 10-timmars arbetsdag.
- För material som hämtas från krossen (0-5 mm, subb, 0-50 mm, 5-50 mm) betalas 3,50 kr/ton för lastning till lastbil eller dumper.

Material	Pris [kr/ton]	Volymvikt [m ³ /ton]
0-5 mm	12,60	1,5
Subb (0-40)	12	1,7
0-50 mm	40-50	1,7
5-50 mm	12,60	1,5

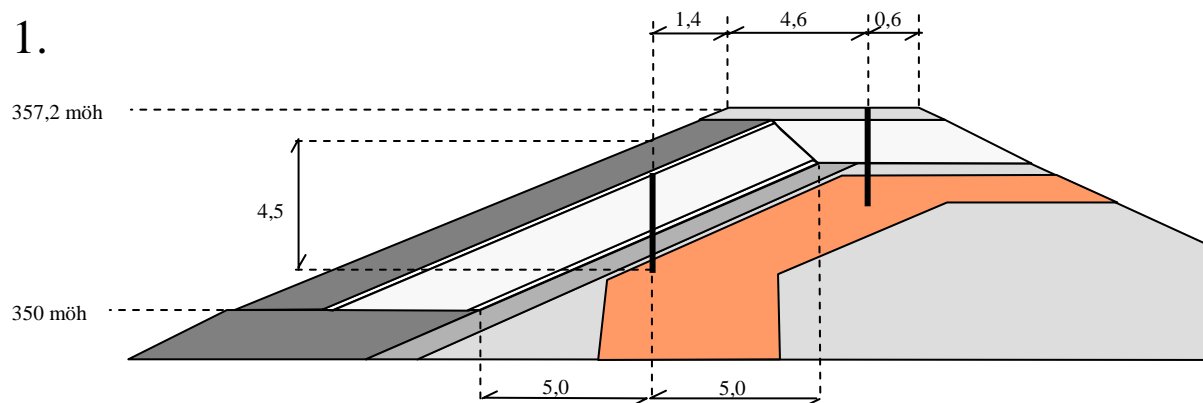
Källa: Martin Lundkvist NCC: 070-397 45 21.

Lastbilarna och dumprarna hinner ca 15 lass per 10 timmars arbetsdag vid körning med krossmaterial.

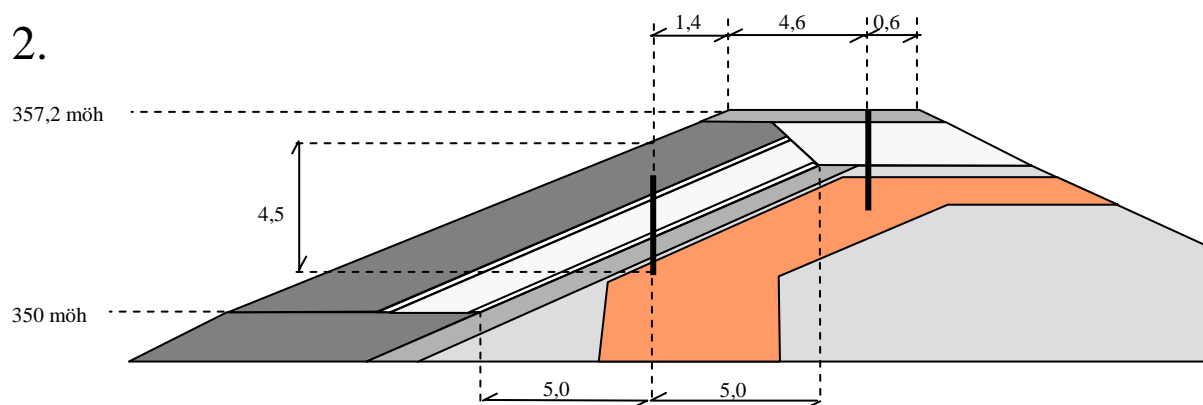
- Sprängsten hämtas ytterligare längre bort och bilarna hinner därför endast med ca 13 lass per 10 timmars arbetsdag. Lastningen av sprängsten sköts av lastare (770 kr/h).
- Byggandet på dammen sköts av en grävmaskin (770 kr/h).
- Isoleringsskivor:
 - Utläggning på slänten med en hastighet av $10 \times 20 = 200 \text{ m}^2$ per dag och anställd.
 - På krönet kan isoleringsskivor läggas ut med en hastighet av $6 \times 50 = 300 \text{ m}^2$ per dag och anställd.
- En man kostar 350 kr/h
- Snöfångare:
 - Stolpar uppges kunna kosta 70 kr/meter hos Stenastål.
 - Vajerpriset är 6,80 kr/meter på Järnhuset, men Peab har 15 % rabatt.
 - Stolpmaterial: Hit räknas linsträckare (38,42 kr/st), vajerlås (7,82 kr/st), ögleskruvar (3,69 kr/st), låsmutter + brickor (0,50 kr/st), slagankare (3,74kr/st). Åtgången för testsektionen med 18 stolpar (av totalt 1086) var: 36 linsträckare, 72 vajerlås, 54 ögleskruvar, 36 slagankare, 18 låsmutter och 18 brickor. Detta motsvarar 127,17 kr/stolpe.
 - En arbetare uppskattas kunna montera 12 stolpar per dag.
 - Nätet kostar mellan 2,96 och 2,28 euro/m² → ca $2,62 \times 9,5 = 24,89 \text{ kr/m}^2$. Totalt behövs 10800 meter, 2 meter breda, nätremсор → 21600 m².
 - Monteringen av snönäten uppskattas ta 144 arbetstimmar
 - Nätmaterial: För montering behövs plankor och skruv för ca 20 000 kr.

Bilaga 13 Borrinstruktioner för Gandahlmätare

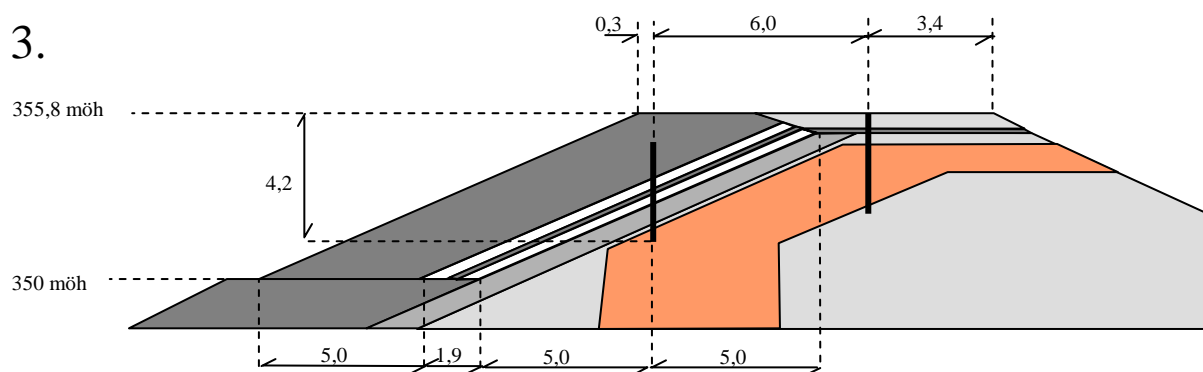
1.



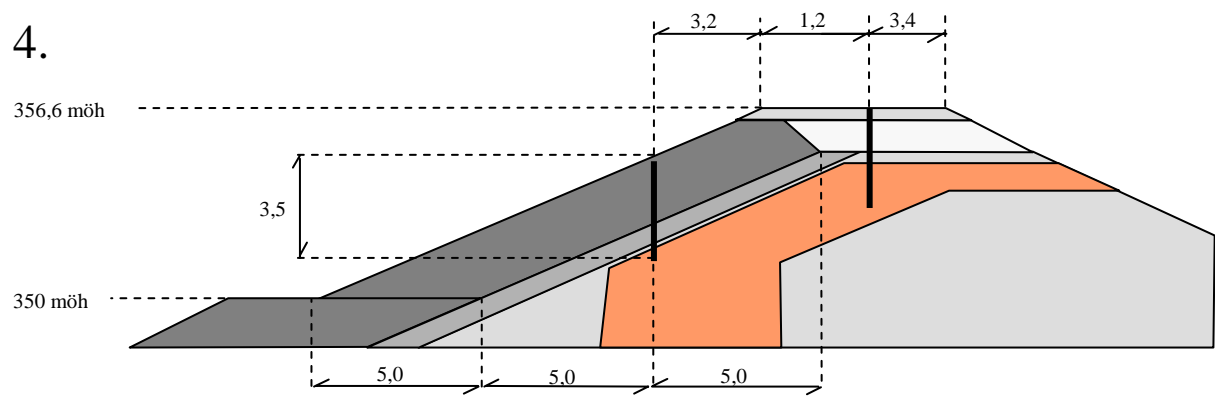
2.



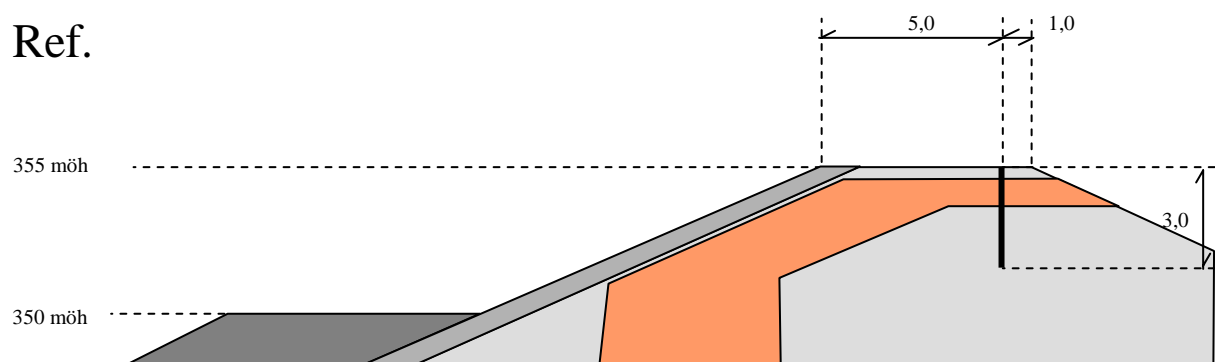
3.



4.



Ref.



Bilaga 14 Undersökning av tät kärnan med georadar

Ett sätt att undersöka vad som finns under markytan utan att påverka jorden är att använda sig av geotekniska metoder. En av dessa metoder är georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) som mäter kontraster av elektromagnetiska egenskaper i marken. En sändare skickar ned en elektromagnetisk våg i marken. Denna våg reflekteras delvis när den stöter på en yta vars dielektriska konstant skiljer sig från övriga markprofilen. Ju större kontrasten är mellan ytorna desto starkare blir den reflekterade signalen. (<http://www.georadar.se/dokument.htm>)

En radarenhet består av en antenn med sändare och mottagare, en kontrollenhet och en dator. Genom att välja antenn med olika frekvens kan man hitta önskade egenskaper med avsikt på penetration och upplösning. En antenn med låg frekvens ger djupare nedträngning men sämre upplösning. Normalt ligger frekvensen på 10- 2000 MHz (Fondelius, 2006). Vi fick möjlighet att få en undersökning genomförd på I-J dammen samt data tolkad av MalåGeoscience expert på området, Christer Gustavsson. Det är nödvändigt att en erfaren person tolkar data då det kan vara svårt att översätta radarns mönster till verkliga förhållanden.



Figur 14.1 *Undersökning av slänten med georadar*

Vid undersökningen av I-J dammen användes tre antenner med olika frekvens, 500 MHz, 250 MHz samt 100 MHz (figur 14.1).

Ungefärligt penetrationsdjup för dessa är:

Antenn	Penetrationsdjup i morän
100 MHz	12 meter
250 MHz	7 meter
500 MHz	3 meter

Bildskärmen kan visa spåret av en enskild puls. Detta spår, *trace*, visar dels energin som utgår från sändaren och dels de reflektioner som kommer tillbaka.

Om man känner markens dielektriska konstant så vet man hur snabbt en elektromagnetisk våg färdas i profilen. Då kan man beräkna på vilket djup en reflektion har skett baserat på hur lång tid radarpulsen tog på sig att gå från sändare till mottagare.

Ett *scan* är presentationen av ett *trace*. Det kan uttryckas som vågform eller som en gråskala där färgerna avgör amplitudens storlek. Vi redovisar resultatet i gråskala.

För att mäta över ett område måste man förflytta radarn. Antennen sänder ut en stor mängd *trace*, ca 1000 per meter, och datorn räknar fram ett medelvärde av dessa *trace*. På så vis minskar störningar som kan uppstå. Vågorna går inte bara rakt nedåt i markprofilen utan sprids som en kon under sändaren. (Fondelius, 2006).

Användningsområden för Georadar

Georadar används främst när man vill undersöka markprofilen till ett begränsat djup på cirka 30 meter. För djupare kartering används till exempel seismiska metoder. Tillämpningar för gruvnäringen kan till exempel vara lokalisering av sprickor samt mineraliseringar. Ingen geologisk bestämning av material kan göras med radar. För det krävs provborring. Men radarn kan användas som en indikator för var det kan tänkas finnas mineralrikt berg och således var det är värt att borra. Att undersöka dammkonstruktioner är för Malå Geoscience ett nytt område. Om det visar sig möjligt kan det i framtiden bli ett alternativ när en undersökning av en fyllnadsdamm behöver genomföras.

Fördelar och begränsningar

Det finns vissa uppenbara fördelar med georadar som undersökningsmetod:

- Ur miljösynpunkt är georadar en utmärkt metod. Ingen åverkan på naturen är nödvändig och inga föroreningar släpps ut.
- GPR är en snabb metod, utrustningen är enkel att hantera och mätningarna kan genomföras av en ensam person.
- Tekniken kan användas oavsett årstid.
- Under gynnsamma förhållanden blir resultatet mycket exakt.

Man bör dock inte glömma att metoden har vissa begränsningar:

- Markens resistivitet har stor betydelse. Lager med mycket mineral är svåra att penetrera och ligger de högt är det svårt att använda radarn. Vattenmättad mark dämpar mer på grund av högre konduktivitet och vattnets höga dielektriska konstant. Ligger däremot dessa lager under ett lager med högre resistivitet kommer en tydlig gräns att kunna detekteras av radarn.
- Mät djupet är begränsat.
- Vertikala strukturer är svårare att uppfatta. Det beror på att reflexen från ett vertikalt lager vinklas bort från mottagaren.

Tolkning av data

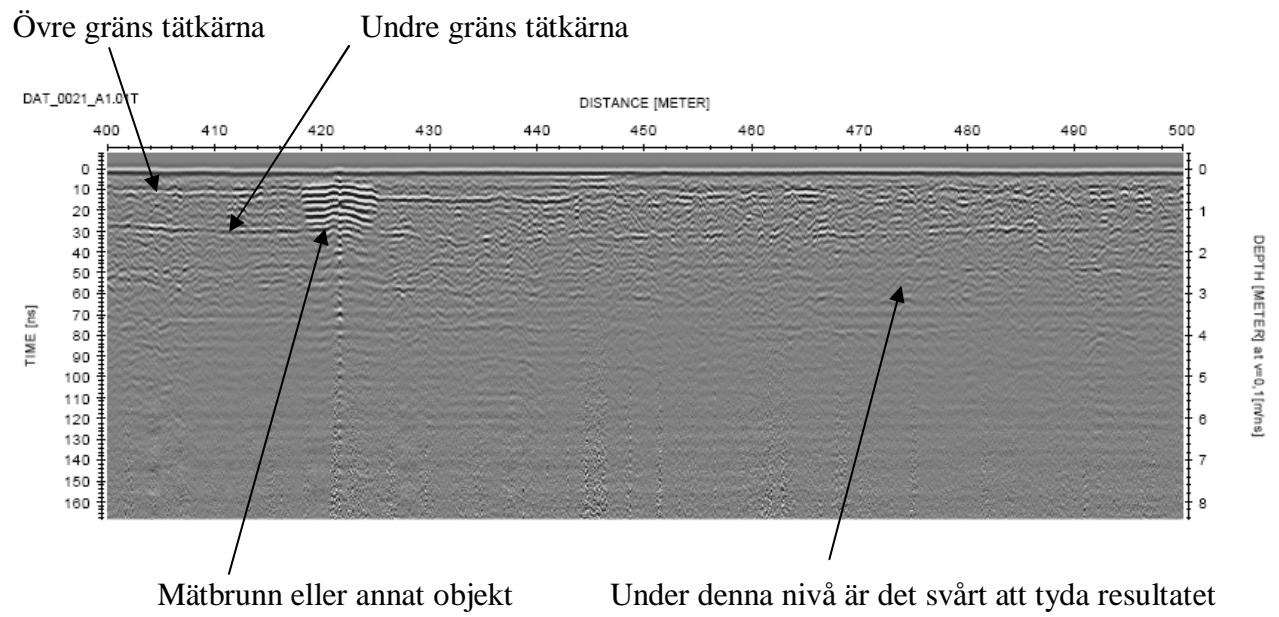
Horisontella skikt i marken uppfattas som ett horisontellt sträck på radarn. Det gynnsammaste fallet är om profilen har ett övre lager med hög resistivitet och ett undre lager med låg resistivitet. Gränsen syns som tydliga linjer i gråskala.

Ett föremål uppfattas på ett annat sätt. Ju närmare föremålet radarn är desto kortare sträcka färdas vågorna. Rätt ovanför föremålet är sträckan kortast. När man går vidare ökar avståndet igen. Föremålet kommer att uppfattas som en hyperbel.

(<http://www.georadar.com/howitwrk.htm>)

Vissa förutsättningar krävs för att penetrationen skall vara tillfredställande och metoden användbar. Christer Gustavsson som hjälpt oss med undersökningen och tolkning av data kom fram till att penetrationen var blandad beroende på var han mätte. Mitt på krönet var det svårare att se ned i markprofilen med radar, men på kanten av krönet gick det bättre. Christer tror det kan bero på att fordonstrafik har packat materialet mitt på krönet. Det packade materialet kan hålla mer vatten och får då högre konduktivitet på grund av vattnets goda ledningsförmåga. Hög konduktivitet är inte önskvärt då en sådan yta reflekterar radarvågor dåligt. I figur 14.2 nedan visas resultatet av en 100 metersträcka mätt med 250 MHz-antennen. Man ser tydligt övre och undre gränsen för tåtkärnan som horisontella linjer i bilden vid djupen 0,5 meter och 1,5 meter. Vidare ses en kraftig reflektion omkring 420-metersmarkeringen. Det kan till exempel vara en mätbrunn eller något annat föremål. Skärpan försämras avsevärt under 2-3 meters djup. Vill man se djupare får man använda en antenn med lägre frekvens men då blir det sämre upplösning i de övre skikten.

Möjligheten att upptäcka skador i dammen till följd av tjälning är klart begränsad. Det som är lätt att upptäcka med radar är skikt i marken, inte enstaka små uppluckringar. Sedan beror det så klart på hur stora skadorna är. Ett stort område med avvikande egenskaper är lättare att upptäcka än ett litet. Ett område som skulle kunna vara mer lämpligt för georadar är mätning av tjälningsträngning. Då är det en hel yta som ska lokaliseras och det är som sagt lättare. Det kan vara ett bra alternativ då det inte kräver ingrepp i marken och framför allt tåtkärnan.



Figur 14.2 Resultattolkning av mätning med georadar