STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT No 11c

Tuveskredet
Hydrogeologi

LINKÖPING 1981

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT No 11c

Tuveskredet
Hydrogeologi

Denna rapport har finansierats av Statens råd för byggnadsforskning, forskningsanslag 781349-1 och 801192-1.

Rapporten har författats av Thorsten Blomquist och Gunnar Gustafson, VIAK AB, Göteborg.

LINKÖPING 1981

ISSN 0348-0755

TRYCK-CENTER AB Linköping 1982

FÖRORD

Grundvattnets betydelse som en av många bidragande faktorer till instabila geotekniska förhållanden är väl omvittnat av såväl geotekniker som geologer. I de utredningar som utförts om skredorsaker har emellertid de geohydrologiska sambanden endast kunnat behandlas översiktligt. Av naturliga skäl har ofta tillräckliga bakgrundsdata om grundvattenförhållandena saknats. Endast rent geotekniska parametrar har i bästa fall funnits dokumenterade från tiden före skredet.

I anslutning till att utredningarna om Tuveskredet påbörjades skisserade VIAK ett program för studium av de geohydrologiska faktorernas inverkan på Tuveskredet.

Programmet syftade till att komplettera de omfattande geotekniska utredningarna med geohydrologiska data och i görligaste mån rekonstruera dessa förhållanden före skredet.

En ansökan om medel för undersökningarna inlämnades till Statens Råd för Byggnadsforskning i januari 1978 och beviljades så att undersökningarna kunde påbörjas redan i april samma år.

Undersökningarna omfattar tre huvuddelar, hydrogeologi, hydrometeorologi och matematiskt modellarbete över Tuveområdet.

Geologiska data har erhållits från det rika borrningsmaterialet för de geotekniska undersökningar som utförts i Göteborgs stads Gatukontors regi. Även hydrogeologiska data har erhållits från dessa undersökningar, som omfattat provpumpningar av flera olika avsnitt i skredområdet.

Hydrometeorologiska uppgifter har hämtats från närliggande meteorologiska stationer och jämförts med längre serier på grundvatten- och portrycksnivåer, bl a från SGU:s grundvattennät.

Med hjälp av dessa har ett försök att rekonstruera förhållandena i Tuve omedelbart före skredet gjorts.

Grundvattenmagasinets geometriska och hydrauliska egenskaper har sammanställts med de hydrometeorologiska uppgifterna och en modell över Tuveområdet har upprättats. Med hjälp av denna modell har slutligen de sanno-

lika förhållandena omedelbart före skredet konstruerats.

Göteborg i november 1980

Thorsten Blomquist Gunnar Gustafson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

HYDROGEOLOGISK SAMMANFATTNING
- Områdets hydrogeologi
- Hydrometeorologi
- Grundvattennivåer före skredet

TUVEOMRÅDET
- Topografi
- Berggrund
- Jordarter
- Geohydrologi

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR
- Allmänt
  - Observationsnät
  - Mätning
- Provpumpningar
  - Almhöjdsvägen
  - Tångenvägen
  - Bergborrhål BH 1
  - Slugtest i Rb 7906 och Rb 7907

SKREDETS INVERKAN PÅ GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDENA
- Före skredet
- Direkt efter skredet
- Återställningsarbetens inverkan på grundvattennivån

HYDROMETEOROLOGI
- Nederbördsförhållanden
  - Nederbördsdata från göteborgstrakten
  - Statistisk beräkning av nederbörden i Säve
  - Sammanfattning
- Nettonederbörd
  - Allmänt
  - Nettonederbörd i göteborgstrakten
  - Sammanfattning

Nederbörd och nettonederbörd i Tuve november 1977
Grundvattennivåer
Grundvattennivån i göteborgstrakten
Korrelation mellan grundvattennivån i Harestad och nettonederbörden
Statistisk bearbetning av grundvattennivådata i Harestad
Sannolikhetsbedömning av meteorologiska förhållanden
Statistisk bearbetning av kombinationen hög grundvattennivå och hög nederbörd
Sammanfattning av hydrometeorologiska data

MODELLSTUDIE AV GRUNDVATTENMAGASINET
FEM-analys
Modell över Tuve
Elementnät och egenskapsområde
Kalibrering av modellen
Tillämpning av modellen
Anpassning till förhållandena före skredet

HYDROGEOLOGISK SAMMANFATTNING

Områdets hydrogeologi

De hydrogeologiska undersökningarna i Tuveområdet har utförts efter det att skredet gått. Detta medför att alla data som insamlats är påverkade av skredet och de störningar detta medfört. Vissa slutsatser om förhållandena före skredet har emellertid varit möjliga att dra. Denna sammanfattning utgör ett försök att utifrån gjorda undersökningar beskriva förhållandena före och efter skredet.

Berggrunden i området kan, i jämförelse med överlagrade friktionsjordar, betraktas som tät. De utförda borrningarna har lokaliserats till Tuvegången och till sprickbildningar karterade från flygbilder. I samtliga bergborrhål har permeabiliteten varit så låg att någon provpumpning för att bestämma bergets egenskaper varit omöjlig att utföra. Den vattenföring, som konstaterats i BH1, måste hänföras till jordlagrens permeabilitet. Berget kan således betraktas som ett tätt underlag och de läckagesamband, som konstaterats vid pumpningarna i friktionsjorden, orsakas av en dränering av den överliggande leran.

På berget ligger en siltig-sandig friktionsjord (morän). I dalgången har provpumpningar utförts på tre ställen: Almhöjdsvägen, Tångenvägen och BH1. Transmissiviteten hos friktionsjorden har beräknats till $2 - 5 \times 10^{-5}$ m^2/s. Detta lager utgör således områdets bästa vattenledare och svarar därför för huvuddelen av grundvattenomsättningen i området. Utanför dalgången har slugtester utförts vid Tångedal. Dessa visar att motsvarande lager här har väsentligt lägre permeabilitet, $T = 4 - 8 \times 10^{-7}$ m^2/s.

På friktionsjordar ligger leran som ett tätande lager. Provpumpningarna visar emellertid att leran dräneras vid en pumpning. Läckagekoefficienten har bestämts till $2 - 8 \times 10^{-9}$ s^{-1}. (Detta gäller under omvända förhållanden.)

Grundvattenmagasinet i friktionsjordar under leran kan således betraktas som slutet. Magasinskoefficienten vid Almhöjdsvägen och Tångenvägen har bestämts till $S = 4 \times 10^{-4}$ respektive $S = 1 \times 10^{-4}$.

Om resultaten av de hydrogeologiska undersökningarna sammanvägs finner man alltså att dalgångens huvudakvifer utgörs av friktionsjordar. Den är sluten och grundvattenbildningen sker vid dalsidorna.

Före skredet finns en notering om att grundvattennivån i dalen stod högre än markytan. Detta förklaras av att den täckande leran går upp på dalsidorna och att den del av grundvattenbildningen, som inte kan transporteras vidare i friktionsjorden, här bräddar och går vidare som ytvattenavrinning. Lerkanten vid dalsidorna utgör således en reglerande nivå i magasinet.

Genom skredet har grundvattennivån sänkts. Detta beror dels på att dräneringsnivån sänkts inom vissa avsnitt, dels på att läckvägar öppnades genom den täckande leran. Genom läkning av läckvägarna och genom de återställningsarbeten som utförts vid den södra dalsidan vid Tångenvägen har sedan grundvattennivån höjts, dock sannolikt ej till den ursprungliga nivån.

För att kontrollera grundvattenmagasinets känslighet för nederbörd har en modellstudie utförts med finita elementmetoden. Studien har visat att grundvattenmagasinet reagerar mycket snabbt på grundvattenbildning från nederbörd. Vi får således en hastig påfyllnad av magasinet upp till bräddningsnivån vid dalsidorna. Därefter avgår överskottet som ytavrinning. Modellstudien har vidare visat att grundvattenflödet i dalgången normalt uppgår till c:a 25 l/min. som avbördas till Kvillebäckens dalgång. Grundvattennivån i huvuddalen reglerar vidare nivån i den nedre delen av Tuvedalen.

Hydrometeorologi

En studie av nederbördförhållandena i området har utförts. Studien har baserats på uppmätt nederbörd i Säve för perioden 1945-1978. Som helhet finner vi att 1977 var ett våtår utan att vara särskilt extremt. Ett undantag är dock november månad 1977 som med sina 120 mm nederbörd endast överskrides en gång per 20 år i medeltal. Det är således den högsta novembernederbörd som fallit i området sedan det exploaterades.

Samma förhållanden gäller även nettonederbörden, nederbörden minus avdunstning, där studien visar att november 1977 är extremt våt, medan året som helhet kan betraktas som ett normalt våtår.

Vidare har grundvattennivåer från SGU:s mätstation i Harestad bearbetats. I detta material finner man inte några extrema förhållanden. Visserligen skedde en snabb uppfyllnad av grundvattennivån hösten 1977, men på grund av att augusti och september inte var särskilt nederbördsrika började uppbyggnaden från en ganska låg nivå och några extremt höga nivåer nåddes aldrig. Här måste man emellertid ta i beaktande att den geohydrologiska studien visat att grundvattenmagasinet i Tuve reagerar mycket snabbt på grundvattenbildning, varför förhållandena här kan ha varit annorlunda.

Grundvattennivån i Tuve kan emellertid inte ha stigit högre än till bräddningsnivån vid dalsidorna. Det är därför troligt att november 1977 i Tuvedalgången karaktäriserats av ett fullt grundvattenmagasin och en extremt stor ytvattenavrinning.

Grundvattennivåer före skredet

Behandlingen av geologiska, meteorologiska och hydrauliska data med matematisk modellanalys har gett en mycket grov bild av hur grundvattenflödet kan ha sett ut före skredet och av vilken omfattning det varit. Arbetet har också visat att mycket små vattenmängder ger upphov till stora och snabba fluktuationer i grundvattenståndet. Ett försök att låsa fast modellen över de relativa grundvattennivåerna har utförts, trots att stora osäkerheter föreligger både i modell och låsningspunkternas tillförlitlighet.

De försök som redovisas i figur 24 avser den stationära modellens utseende efter nederbördsförhållandena i slutet av november 1977. Bilden visar att stora delar av området haft ett grundvattenövertryck om mer än 2 m över markytan. I vissa centrala lågpunkter uppgår övertrycket till 4 m eller mera. Osäkerheten i modellens anpassning är svår att ange, men kan bedömas medföra en avvikelse i storleksordningen $\pm$ 1 m.

TUVEOMRÅDET

Topografi

Skredområdet utgör en västlig bidal till Kvillebäckens dalgång. Dalen begränsas i norr av ett markant höjdparti, Snarberget, och i söder av flera mindre höjdryggar. Dalgången övertvärades före skredet av Tuve Kyrkväg och var i sina inre och norra sluttningar bebyggd med villor och radhus. En mindre bäck följde Tuvedalen och mynnade i Kvillebäcken. I samband med exploateringen kulverterades bäcken under och väster om Tuve Kyrkväg.

Berggrund

Inom markerat kartområde (fig 1) kan fem bergartsled särskiljas. Längst mot öster på kartbladet finns en röd fältspatrik och homogen gnejsgranit, som i väster gränsar mot en tunn amfibolithorisont. Denna röda gnejsgranit kan stråkvis sönderfalla till ett luckert grus som t ex i Skändlaberget 2 km N om Tuve samt i V kanten av Kvillebäckens dalgång vid Grimbo. I sin västra begränsning åtföljs denna gnejsgranit ständigt av en amfibolithorisont, som ömsom ökar i mäktighet, ömsom tänjs ut till en tunn horisont. Amfiboliten efterföljs åt väster av ett mäktigt parti ögonförande röd gnejsgranit med stråk av röd finkornig gnejs. Den finkorniga gnejsen utgör alltså kartans västbegränsning. Strykningen för gnejserna i området är N-S-lig, stupande mot väster.

I riktningen WNW-ESE genomslås dessa gnejser av Tuvegången. Denna gång utgörs av en ca 100 m mäktig diabasintrusion. Diabasen är en plagioklasrik variant av olivindiabas och har en jämförelsevis grov struktur.

Den tektoniska bilden i området domineras av kraftiga N-S-liga sprickzoner. Kraftigt markerade i naturen är även de WNW-liga och ENE-liga spricksystemen. E-W sprickor förekommer men är ej dominanta.

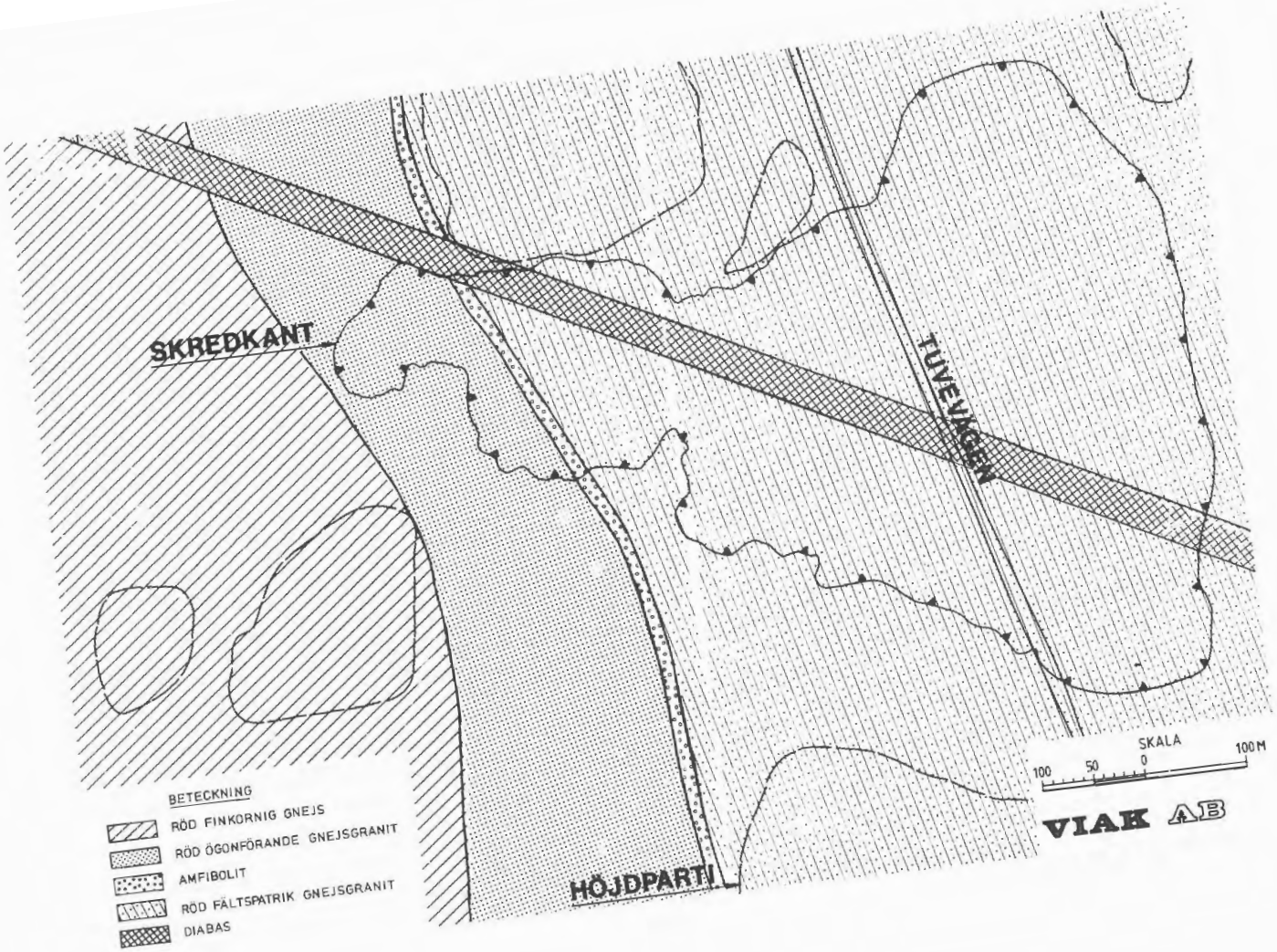

SKREDKANT
TUVEVÄGEN
HÖJDPARTI
BETECKNING
RÖD FINKORNIG GNEJS
RÖD ÖGONFÖRANDE GNEJSGRANIT
AMFIBOLIT
RÖD FÄLTSPATRIK GNEJSGRANIT
DIABAS
SKALA
100 50 0 100 M
VIAK AB

Fig 1

Erfarenheter vid tunnelarbeten på östra Hisingen indikerar att det N-S-liga sprickstråket i Kvillebäcksdalens västra del, med ungefärligen samma läge som den nya vägen mot Säve och med västlig stupning, är starkt vattenförande. Dessutom är de större WNW-liga sprickstråken ofta starkt vattenförande ehuru leromvandlingar ibland förekommer i dessa sprickor och sålunda kan hämma vattenföringen. Tuvegången ligger i en WNW-spricka och det finns anledning förmoda att åtminstone den ena kontakten mot sidoberget kan vara en vattenförande sprickzon.

Jordarter

Tuvedalgången omges av berggrundsbetingade höjdpartier (fig 2). Dessa är delvis kalspolade, delvis täckta av friktionsjordar typ morän eller svallad morän. Lågområden utfylls av leror, som i dalens nedre delar når betydande mäktigheter. I dalgångens ytterområden når leran relativt högt upp på sluttningarna. I dessa avsnitt överlagras leran på många ställen av sandiga, siltiga svallsediment.

Hela skredärret är utbildat i lera och når oftast ner i de varviga eller skiktade bottendelarna hos den glaciala leran. Enligt den detaljerade undersökning av området som redovisas i Sveriges Geologiska Undersökning (SGI Rapport No 11 b) förekommer ett sand- och siltskikt i leran. Detta skikt ligger relativt ytligt (< 5 m) i skredområdets norra delar och går i dagen väster om skredets inre gräns.

Under leran i Tuvedalen förekommer sandiga, siltiga jordar vars mäktighet ställvis kan uppgå till någon meter. På ett par platser som exempelvis vid Almhöjdsvägen i skredets NV del, har friktionsjordar om 5-6 m mäktighet påträffats.

Geohydrologi

Grundvattenmagasinet i Tuvedalen utgörs i första hand av de friktionsjordar som förekommer under leran i dalen och längs berg- och moränsidorna. Leran i sig innehåller ett begränsat grundvattenmagasin i torrskorpans sprickor och ytliga begränsade magasin kan förekomma i lokala sand- och siltskikt. Nybildning av grundvatten kan förutsättas ske till större delen i dalens randområden, där grundvattenmagasinets friktionsjordar går i dagen.

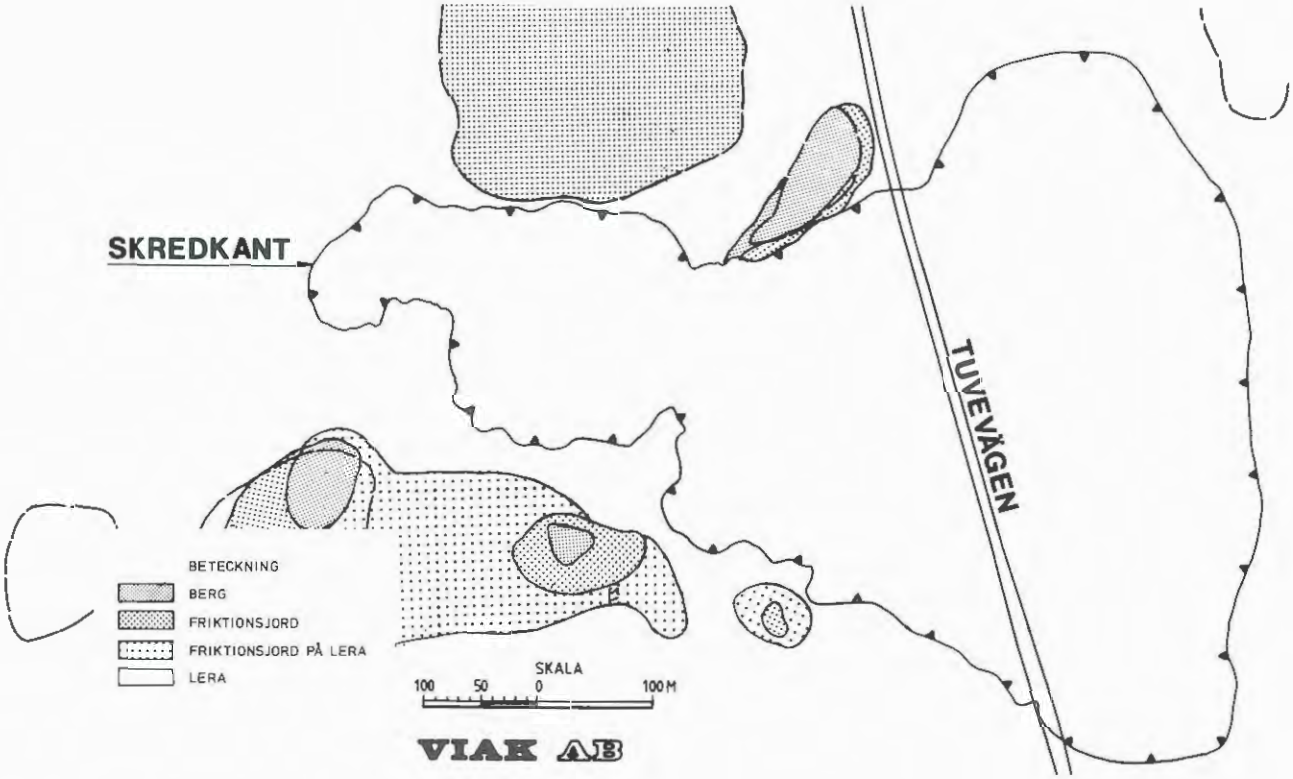

SKREDKANT
TUVEVÄGEN
BETECKNING
BERG
FRIKTIONSJORD
FRIKTIONSJORD PÅ LERA
LERA
SKALA
100 50 0 100 M
VIAK AB

Fig 2

En uppdelning i tre olika formationer kan göras enligt följande:

- Överst ligger den störda leran med mycket liten vattentransporterande förmåga och bildar ett tätande lager.
- Bottendelarna av leran innehåller siltiga skikt. Ställvis underlagras dessa av sandiga sediment med mycket lokal utbredning. Friktionsjorden, som i övrigt underlagrar leran, är något vattenförande. Magasinskoefficienten, S, är låg, vilket är karaktäristiskt för en sluten akvifär av denna typ. Vidare är transmissiviteten relativt hög jämfört med morän i allmänhet. Tillsammans innebär de hydrauliska egenskaperna att området är känsligt för störningar. Små vattenuttag ger t ex snabbt stora effekter på grundvattentrycken i omgivningen.
- Berget är den tredje formationen. Sannolikt representerar lågpunkterna i bergytan, de trasigaste, mest vattenförande delarna av denna.

  Ett flertal bergborrningar har utförts i området, vars resultat visar att berget endast är svagt vattenförande. Det enda undantaget är de ytligare partierna av Tuvegångens diabas, där vattnet i ett starkt uppsprucket ytparti har god kontakt med grundvattenmagasinet i jordlagren. Ingen borrning penetrerar dock kontakten mellan Tuvegången och dess sidoberg, vilken kan vara en vattenförande zon.

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Allmänt

Det geohydrologiska undersökningsmaterialet från tiden före skredet inskränker sig till äldre geotekniska undersökningar med grundvattennivåmätningar i några enstaka punkter. En mätpunkt väster om Almhöjdsområdet antyder att grundvattennivån här kan ha legat strax över markytan. Från de övriga delarna av skredområdet saknas uppgifter.

Det har ofta framhållits, att exceptionellt höga grundvattentrycknivåer skulle ha rått inom skredområdet. Därför har jämförelser gjorts med observationer, från en motsvarande dalgång belägen något öster om Tuve, Kärraområdet i Götaälvdalen samt med mätningar som utförts i SGU:s grundvattenkors i Göteborg. Resultatet av mätningar från en station inom Kärraområdet framgår av figur 3, (Maripuu Berntson, Tuveskredet Geohydrologisk översikt, Väg- och vattenbyggaren 8-9 1978). Fluktuationerna hos grundvattennivån visar sig vara stora, med en årsamplitud om ca 2m vattenpelare (20 kPa). Vidare framgår av mätningar i detta område att grundvattentryck och portryck visserligen haft höga värden i november 1977, men att de i jämförelse med uppmätta tryck under föregående år inte är exceptionellt höga. Det som möjligen avviker från tidigare år under 1970-talet är att påfyllnaden av magasinet sker ganska tidigt under hösten, samtidigt som tryckförändringen sker förhållandevis snabbt. Under förutsättning att dessa fluktuationer är nederbördsbetingade, vilket är högst sannolikt, torde liknande förhållanden rimligtvis ha förekommit tidigare inom Tuve skredområde.

Även om inga absoluta jämförelser kan göras mellan Kärra och Harestad (SGU grundvattennät) å ena sidan och Tuveområdet å andra visar kurvorna en god överensstämmelse.

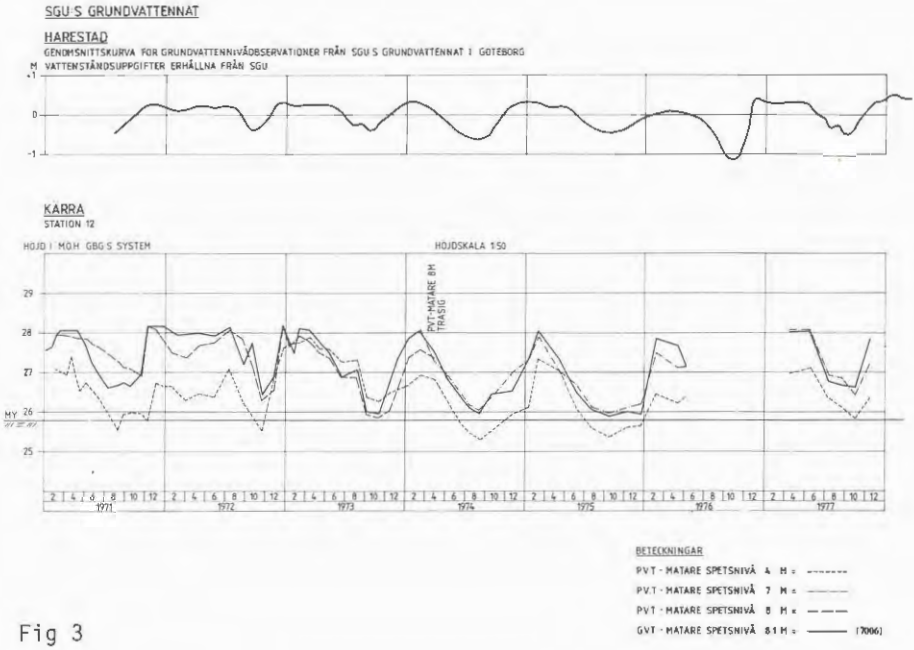


Fig 3

Observationsnät

I samband med att geotekniska undersökningar startade efter skredet påbörjades också geohydrologiska undersökningar. Dessa utfördes i första hand utanför skredområdet och omfattade mätning av såväl grundvattentryck i friktionsmaterialet under leran som mätning av portryck i leran. Mätningarna utanför skredområdet kompletterades efter ca två veckor med mätningar inom området.

Mätning

Inom och utom skredområdet har ett stort antal mätstationer för registrering av portryck upprättats. För mätning av portrycket har dels slutna mätare typ Bat, dels öppna filterspetsar typ Geotech, använts.
I de flesta stationerna har mätare placerats på flera nivåer, så att registrering av portrycksprofilen är möjlig.
Närmast inpå friktionsjorden under leran har i regel öppna filterspetsar typ Geotech utnyttjats för att registrera grundvattentrycknivån.

Ett flertal rörborrningar för att observera grundvattentrycknivån har utförts. Stålrör med perforerad spets och diametern 50 mm har använts.

I huvudsak har borrningarna koncentrerats kring de två provpumpningsområdena, Almhöjdsvägen och Tångenvägen. I övriga områden har enstaka rör drivits för att verifiera jordlagerföljd och möjliggöra mätning av grundvattennivån. Jordlagerföljden samt den vattentransporterande förmågan har bedömts i respektive jordlager. Utförda rörborrningars läge visas i figur 5 och 7.

Extremt höga grundvattennivåer i skredområdet i Tuve skulle kunna orsakas av ett stort tillflöde av grundvatten genom berggrunden. De omgivande bergspartierna ligger avsevärt högre än dalgången och en stor grundvattenbildning i dessa skulle kunna ge mycket höga grundvattentryck.

För att kontrollera bergets vattenförande egenskaper utfördes fem bergborrhål i områdets viktigaste sprickzoner samt i "Tuvegången". Samtliga borrhål visar emellertid ett mycker tätt berg. Ett undantag utgör möjligen BH 1, som placerats i Tuvegången. En provpumpning av borrhålet har emellertid visat att det sannolikt är jordlagren som leder vatten till hålet och att det läcker in vid övergången mellan jord och berg.

Bergborrhålen har således visat att berget i stort kan betraktas som ett tätt underlag och att vattenmängder av betydelse för grundvattennivåerna i dalgången inte kan ledas från de omgivande höjdpartierna genom berggrundens spricksystem.

Provpumpningar

För att studera de geohydrologiska konsekvenserna av föreslagna förstärkningsåtgärder har provpumpningar gjorts vid Almhöjdsvägen och Tångenvägen (Göteborgs Stads Gatukontor). Genom borrningar utförda i samband med dessa undersökningar erhölls en god information om geologin och en möjlighet att bedöma permeabiliteten hos genomborrade jordlager med hjälp av jordartsbestämning och vattenföringsmätningar. Några av rören kom att tjäna som brunnsrör vid pumpningarna.

Pumpningarna har utförts som korttidsprovpumpningar och utvärderats enligt teorier för icke stationärt flödestillstånd.

Almhöjdsvägen

Provpumpningen startades den 19 januari och pågick med ett varierande vattenuttag till den 23 januari. Vattenuttaget gjordes ur Rb 7806 och var i början ca 5 l/min, men inströmning av silt i pumpröret orsakade sådana störningar i vattenuppfordringen att den periodvis avtog helt. Under de första 20 timmarna av pumpningen var dock kapaciteten relativt konstant och kontinuerlig och uppgick till i medeltal 4 l/min.

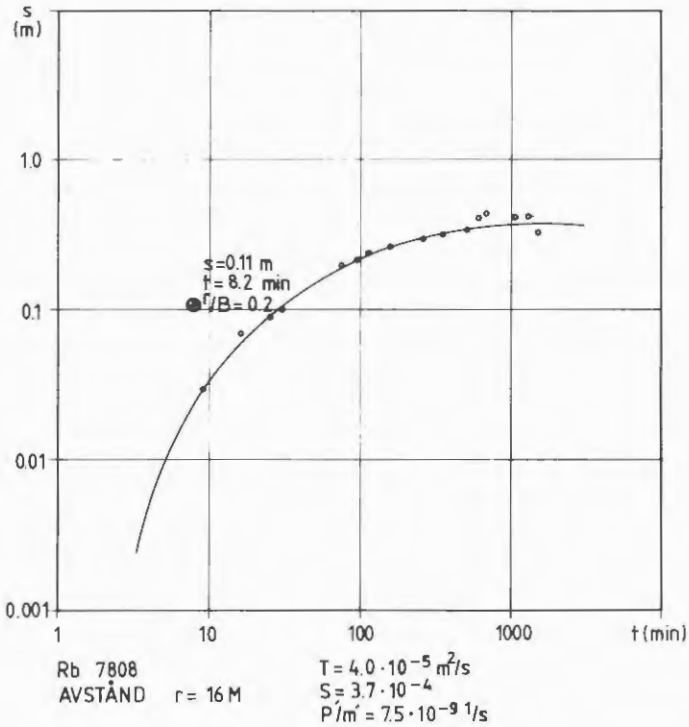


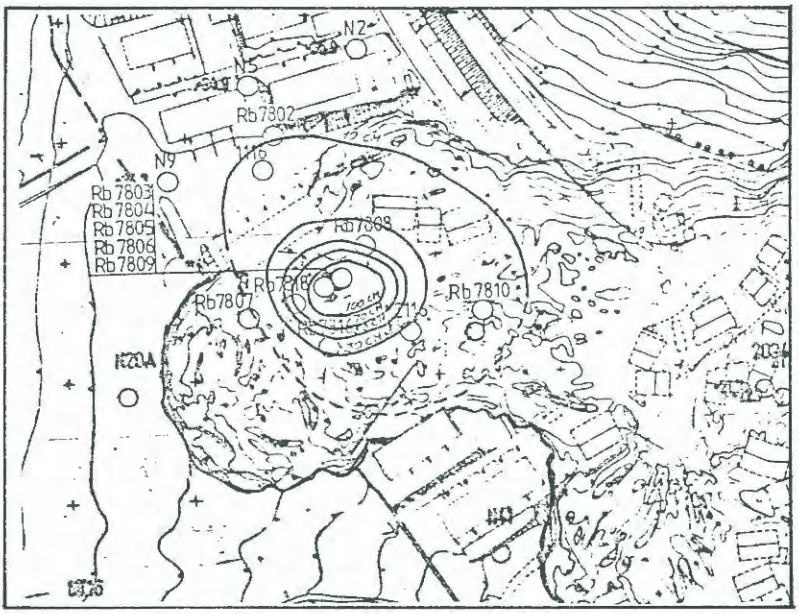
Fig 4

Avsänkningsförloppet mättes i sju observationsrör samt i fem portrycksmätare, drivna till friktionsmaterial. Observationsrören var: Rb 7802, Rb 7805, Rb 7807, Rb 7808, Rb 7810, Rb 7816 och Rb 7818. Portrycksmätarna var: N2, N5, N7, N9 och N20A.

Dessutom observerades portrycksförändringarna i leran på flera nivåer vid två stationer med hjälp av portrycksmätare av typ Bat.

Avsänkningsförloppet för ett representativt rör, Rb 7808, redovisas i dubbellogaritmisk avbildning som funktion av tiden. (Fig 4)

Samtliga observationsrör visar en tydlig påverkan av pumpningen. (Fig 5)



TUVE, ALMHÖJDSVÄGEN
KORTTIDSPROVPUMPNING
AVSÄNKNING EFTER 20 TIM.

Fig 5

De för utvärderingen av provpumpningen viktigaste observationspunkterna har sammanställts i tabell 1. Nivåerna hänför sig till Göteborgs höjdsystem.

Tabell 1 - Sammanställning av data för observationspunkter

Observationspunkt	Höjd rör överkant (m)	Avstånd till pumpplats (m)	Gvy före pumpstart (m)	Avsänkning efter ca 18 tim (m)
Rb 7805	+28,27	1	+27,38	4,06
Rb 7808	+29,22	16	+27,62	0,42
Rb 7818	+29,27	16	+28,17	0,67
Rb 7816	+28,13	20	+28,03	0,30
Rb 7807	+29,78	30	+29,36	0,11
Rb 7810	+27,04	35	+26,24	0,18
Rb 7802	+35,76	50	+31,13	0,14

Resultaten från portrycksmätarna av typ Geotech redovisas i tabell 2.

Tabell 2 - Sammanställning av data för portrycksmätare av typ Geotech

Observationspunkt	Markyta (m)	Avstånd till pumpplats (m)	Gvy före pumpstart (m)	Avsänkning efter ca 18 tim (m)
N9	+34,4	64	+32,73	0,05
N5	+35,1	72	+32,26	0,09
N2	+35,9	78	+32,81	0,04
N20A	+35,1	78	+32,96	0,03
N7	+37,1	134	+35,34	0,0

På grund av pågående arbeten, såsom massförflyttningar, jord-berg-sonderingar och provisorisk husförstärkning i anslutning till provpumpningsplatsen, stördes jordlagren i bottendelarna så att en jämn pumpkapacitet var omöjlig att upprätthålla. Utvärderingen har därför utförts på den relativt ostörda inledningen och på återhämtningsförloppet. Avsänkningar observerades inom ett område med ca 100 m radie kring pumpplatsen.

Med hjälp av erhållna data har grundvattenmagasinets hydrauliska egenskaper bestämts. Transmissiviteten, T, och magasinskoefficienten, S, har beräknats enligt några olika metoder. En viss variation har därvid erhållits. Detta beror på att friktionsmaterialets mäktighet och sammansättning varierar. Av pumpningen framgår också att tillflöde till det provpumpade magasinet, moränen, sker genom läckage från ovan- eller underliggande formationer. Utvärderingen tar hänsyn till detta genom den beräknade läckagekoefficienten.

Med hjälp av erhållna medelvärden har det naturliga grundvattenflödet i dalgången vid Almhöjdsvägen beräknats till ca 20-30 l/min under januari 1978.

Grundvattennivåerna har mätts under hela byggnadstiden. En jämförelse mellan den upprättade prognosen och uppmätta värden har visat god överensstämmelse.

Almhöjdsområdets hydrauliska egenskaper

Provpumpningen i Almhöjdsområdet visar dels att det naturliga grundvattenflödet för januari 1978 är av storleksordningen 20-30 l/min, dels att läckage förekommer från ovan- eller underliggande formationer, vilket reducerar effekten av en framtida grundvattensänkning. Vidare att grundvattenmagasinets hydrauliska parametrar är av storleksordningen

$T = 3 \times 10^{-5}\ m^2/s$

$S = 4 \times 10^{-4}$

$P'/m' = 8 \times 10^{-9}\ l/s^{-1}$

och att stationära förhållanden snabbt utbildas samt att avsänkningstratten blir relativt flack.

Den prognos som uppställts för grundvattennivåerna i Almhöjdsområdet har jämförts med uppmätta värden. Prognos och mätningar har stämt väl överens, vilket kan tas som intäkt för att de utvärderade hydrauliska egenskaperna är riktiga.

Tångenvägen

Provpumpningen startades den 25 januari och pågick med ett konstant, kontinuerligt vattenuttag av ca 10 l/min till den 30 januari. Vattenuttaget gjordes ur Rb 7812, ett 2" observationsrör med perforerad spets.

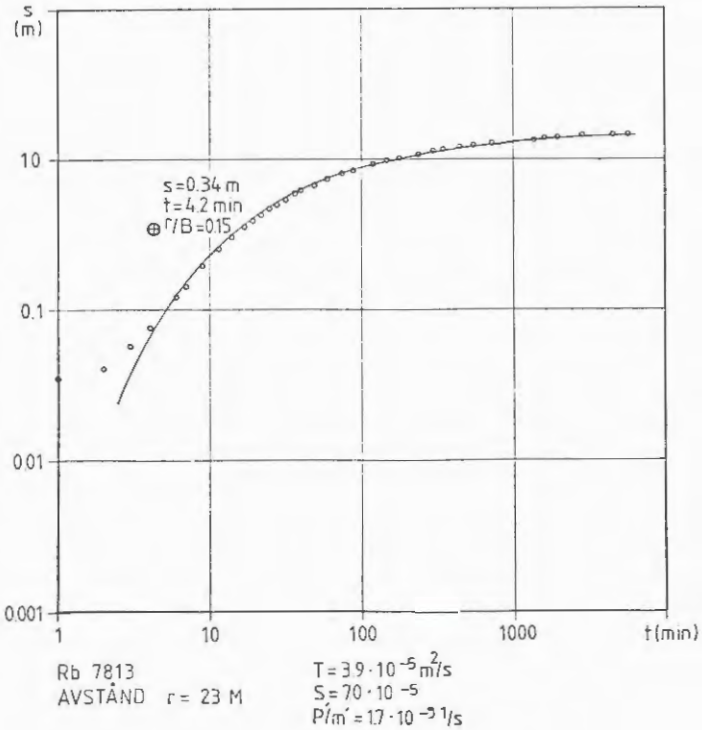
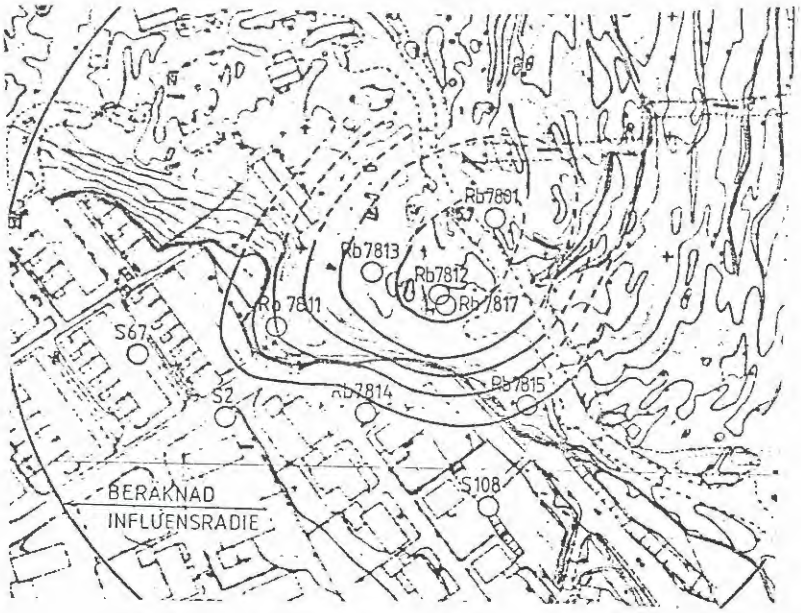


Fig 6

Avsänkningsförloppet mättes i sex observationsrör och i sex portrycksmätare, som var drivna till friktionsmaterial. Observationsrören var: Rb 7801, Rb 7811, Rb 7812, Rb 7813, Rb 7814 och Rb 7815. Portrycksmätarna var: S2, S56, S67, S71, S78 och S108. Deras lägen framgår av ritning nr

Avsänkningsförloppet för ett representativt rör Rb 7813 redovisas i dubbellogaritmisk avbildning i fig 6.

Samtliga observationsrör visar en tydlig påverkan av provpumpningen. (Fig 7)



TUVE, TÅNGENVÄGEN
KORTTIDSPROVPUMPNING
AVSÄNKNING FÖRE
PUMPSTOPP

Fig 7

De för utvärderingen av provpumpningen intressanta observationspunkterna har sammanställts i tabell 4. Nivåerna hänför sig till Göteborgs höjdsystem.

Tabell 4 - Sammanställning av data för observationspunkter

Observationspunkt	Höjd överkant (m)	Avstånd till pumpplats (m)	Gvy före pumpstart (m)	Avsänkning före pumpstopp (m)
Rb 7812	+17,60	1,5	+16,13	3,49
Rb 7813	+17,79	23	+17,39	1,43
Rb 7801	+18,59	32	+18,49	2,48
Rb 7814	+23,94	47	+19,38	0,23
Rb 7815	+18,01	47	+16,49	0,33
Rb 7811	+20,19	54	+18,65	0,50

Resultaten från portrycksmätarna av typ Geotech redovisas i tabell 5.

Tabell 5 - Sammanställning av data för portrycksmätare av typ Geotech

Observationspunkt	Markyta (m)	Avstånd till pumpplats (m)	Gvy före pumpstart (m)	Avsänkning före pumpstopp (m)
S108	+20,9	72	+18,16	0,21
S2	+25,5	80	+21,53	0,21
S67	+26,8	100	+23,15	0,28
S78	+27,9	135	+25,22	0,10
S71	+28,7	187	+27,11	0,20
S56	+29,3	192	+26,75	0,0

För att bedöma grundvattenmagasinets hydrauliska egenskaper har provpumpningsresultaten utvärderats. Beräkning av transmissiviteten, T, och magasinskoefficienten, S, samt i förekommande fall läckagekoefficienten, P'/m', har gjorts.

En relativt stor avvikelse mellan vissa mätvärden förekommer vid jämförelse mellan observationsrören. Variationen mellan respektive observationsrör tyder på att de vattenförande sedimenten är mycket varierande i både permeabilitet och mäktighet.

Läckaget kan innebära dels att kommunikation råder mellan grovsedimenten och berggrunden, dels att finsedimenten dräneras. Ett tredje alternativ kan vara att en viss kommunikation kan ha uppstått mellan markytan och grundvattenmagasinet, genom den uppbrytning av det homogena lerlagret som skredet orsakat.

Områdets hydrauliska egenskaper vid Tångenvägen

Genom den utförda provpumpningen vid Tångenvägen har de hydrauliska egenskaperna för grundvattenmagasinet i moränen kunnat bestämmas och en god uppfattning om dess mäktighet och utsträckning har erhållits i undersökningsområdet. Grundvattenmagasinets hydrauliska parametrar är av storleksordningen

$T = 2 \cdot 10^{-5}\ m^2/s$

$S = 1 \cdot 10^{-4}$

$P'/m' = 2 \cdot 10^{-9}\ s^{-1}$

Undersökningsmaterialet kan användas för att studera och bestämma konsekvenserna av andra störningar och utgör ett väsentligt bidrag till den allmänna geohydrologiska bilden av området. På grund av att grundvattennivåerna före skredet inte är helt kända föreligger en extra svårighet i att bedöma framtida grundvattennivå. Liksom för Almhöjdsvägen representerar de prognostiserade värdena ett tillfälle under året och kommer att pendla kring detta värde beroende på den naturliga grundvattenbildningen.

Bergborrhål BH 1

I bergborrhål BH 1 har en kort provpumpning, ett enhålsförsök, utförts. Uttagen vattenmängd var ca 40 l/min under ca 2 timmar. Som framgår av figur 8 sker en brunnstömning efter ca en halvtimmas provpumpning. Utvärdering av T-värdet på den första halvtimmen är jämförbart med T-värdet i jordlagren kring Almhöjdsvägen.

Bergborran tycks alltså stå i direkt kontakt med jordlagren i de ytliga partierna av berget och är i övrigt fri från vattenförande sprickor av betydelse.

Avsänkningen då brunnstömningen börjar är 8 meter, vilket överensstämmer väl med jorddjupet i denna punkt. Transmissiviteten i övergångszonen mellan berg och jord har bestämts till $T = 5\text{-}10^{5}$ m^2/s.

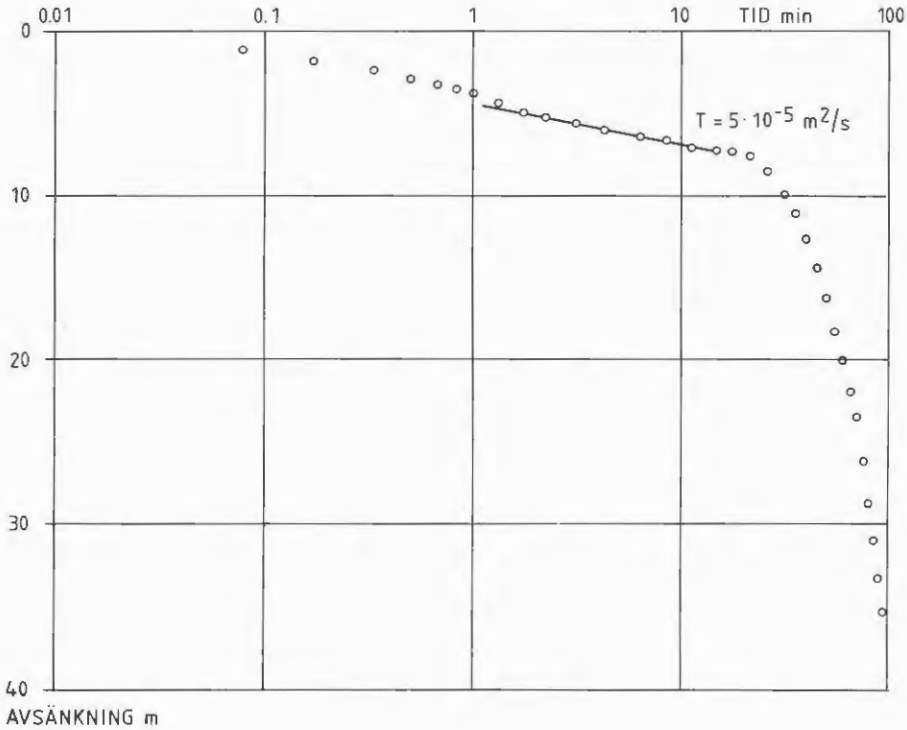


Fig 8

Slugtest i Rb 7906 och Rb 7907

På grund av att jordarten var alltför finkornig kunde inte någon provpumpning utföras vid Tångedal. Genom slugtest i Rb 7906 och Rb 7907 har ändock T-värdet för området grovt kunnat beräknas. En slugtest utföres på så vis att observationsröret fylls på eller töms på sitt vatten momentant, varefter avsänknings- eller stigningsförloppet registreras och utvärderas. Figur 9 visar stigningsförloppet i respektive obsrör efter momentan tömning av vattnet.

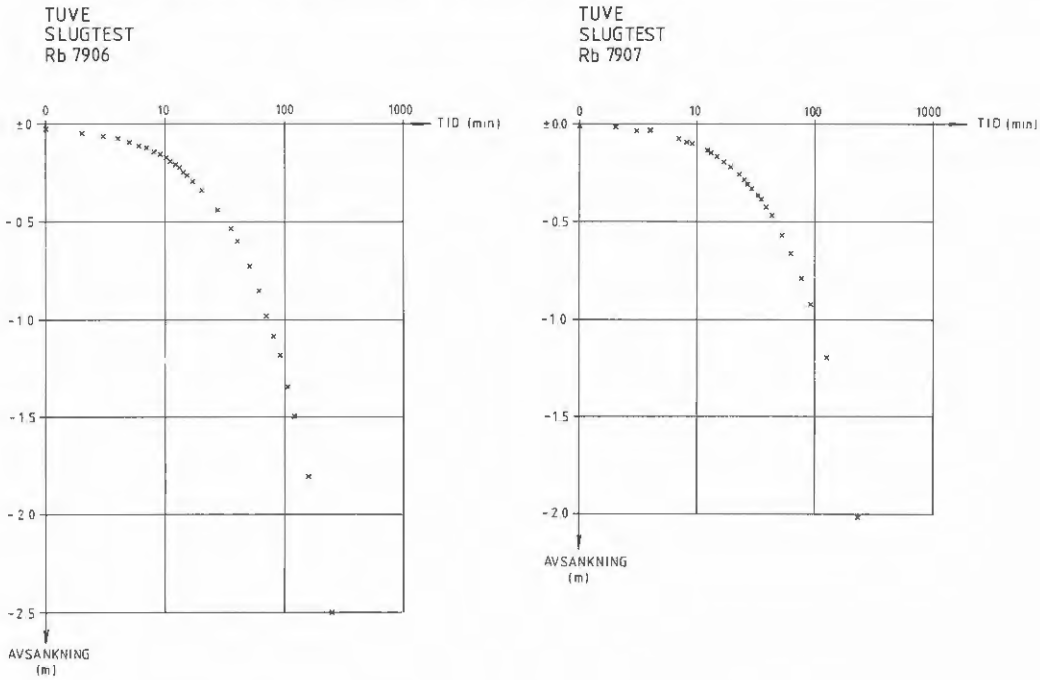


Fig 9

$T = 8 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$ $T = 4 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$

Transmissiviteten anger att de vattentransporterande egenskaperna i detta område är dåliga och av bergborrningen framgår att berget inom Tångedal kan betecknas som relativt tätt. En grundvattensänkning vid skredkanten kommer att få en mycket lokal utbredning.

SKREDETS INVERKAN PÅ GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDENA

Före skredet

Som nämnts i pkt 2.1 finns mycket liten information om de geohydrologiska förhållandena före skredet.
Av områdets topografi och den kända nivån vid Almhöjdsområdet kan dock antagas att grundvattenytans trycknivå i förhållande till markytan legat högre i de nedre delarna av skredområdet och att leområdet som helhet haft en artesisk grundvattentrycknivå.

Enligt samtliga rapporter lär ett källutflöde ha existerat på Snarbergets sydsluttning ungefär på 32 m nivån (Gbg syst).

Direkt efter skredet

I samband med att geotekniska undersökningar startade efter skredet påbörjades också geohydrologiska undersökningar. Dessa omfattade i första hand mätning av grundvattentryck i friktionsmaterialet under leran samt mätning av portryck i leran.

Efter de inledande mätningarna kunde en första trycknivåkarta av grundvattenförhållandena erhållas, fig 10 . Av figuren framgår att tämligen stora gradienter finns i områdena vid Almhöjdsvägen och Tångenvägen. Grundvattentrycknivåerna ligger utanför dessa områden strax under markytan. Nere i skredområdet ligger trycknivån i eller strax över den störda, nuvarande markytan.

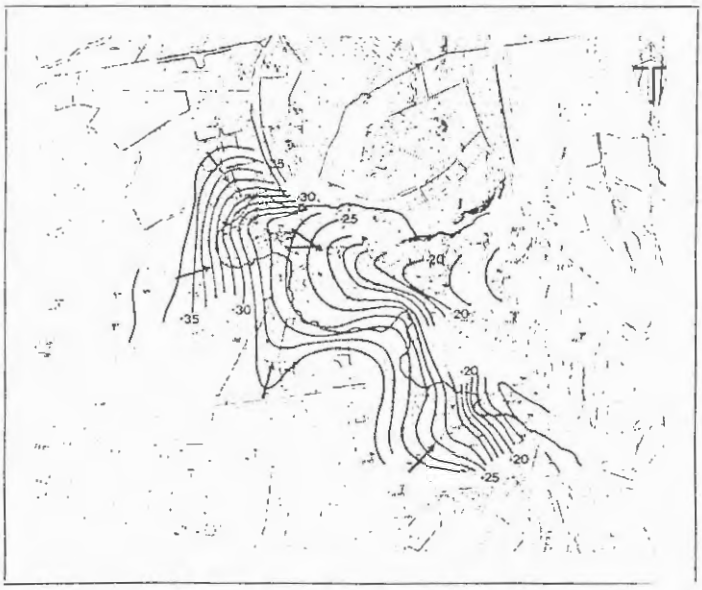


Fig 10A. Grundvattenkarta med trycknivåer i vecka 1, 1978.

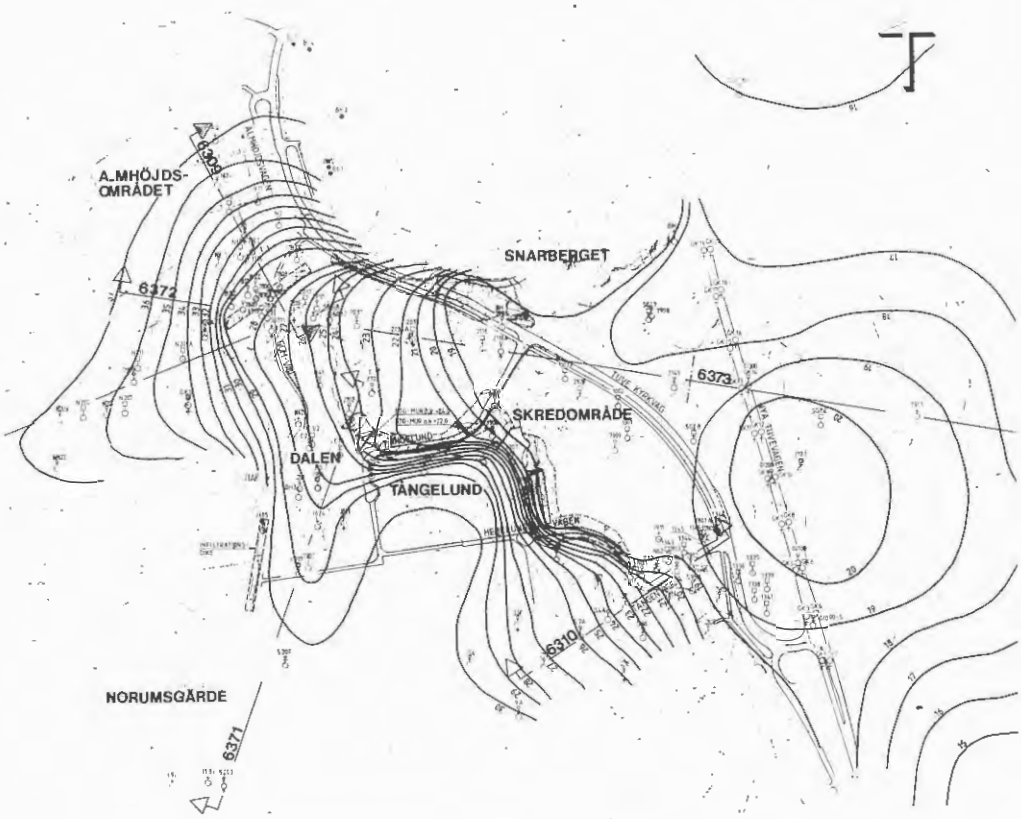


Fig 10B. Grundvattenkarta med trycknivåer i vecka 49, 1979.

Återställningsarbetens inverkan på grundvattennivån

För att stabilisera och i vissa fall försöka höja grundvattennivån utanför skredområdet har olika insatser utförts.
Vid Almhöjdsvägen konstruerades en sprängstensbank av stabilitetsskäl. En sådan bank skulle kunna komma att fungera som en stor drän i området och orsaka betydande grundvattensänkningar. För att förhindra detta upprätthålls en relativt konstant nivå i sprängstensbanken. Trycknivån inom Almhöjdsområdet uppvisar relativt stabila förhållanden med en normal amplitud under perioden efter sprängstensbankens tillkomst, se fig 11.

Rb 7802

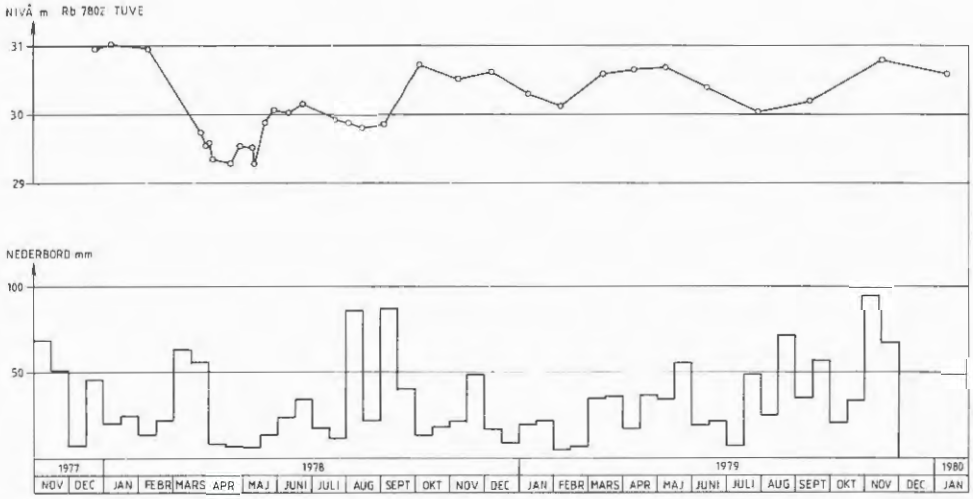


Fig 11

Ingreppet har således haft relativt liten effekt på grundvattenbalansen i området, vilket också prognosticerades med ledning av resultaten från provpumpningen.

Vid Tångenvägen kan en markant trycknivåförändring utläsas under sommaren 1978, se fig 12. Under samma period utfördes relativt omfattande arbeten med planering av marken i området. Troligtvis har de genom skredet uppkomna vertikala dränagevägarna åter förslutits.

Rb 7811

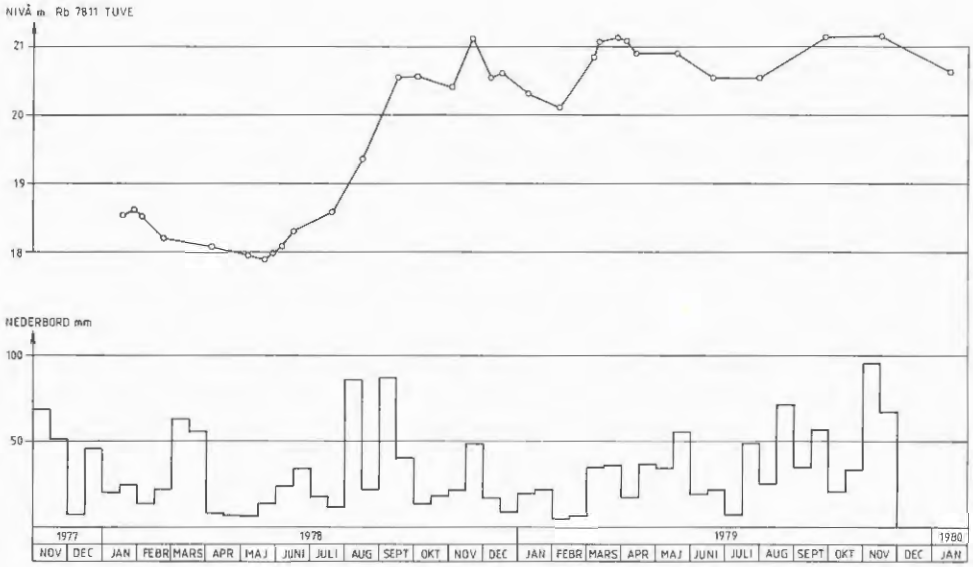


Fig 12

Grundvattennivån årsskiftet 1979-80

Grundvattentrycknivån vid årsskiftet 1979-80 redovisas i fig 10B. Av figuren framgår att förhållandena obetydligt skiljer sig från fig 10A. Några kompletteringar i observationsnätet har dock förändrat nivålinjernas utseende något. Vid Tångenvägen kan en markerad höjning av nivån registreras.

Med undantag för en lokal anpassning till utförda arbeten har grundvattennivåerna direkt efter skredet i stort sett bibehållits. Detta verifierar grundvattenmagasinets egenskap att snabbt reagera på förändringar.

HYDROMETEOROLOGI

Nederbördsförhållanden

Nederbördsdata från göteborgstrakten

Under intervallet 1860-1920 var medelnederbörden för Göteborg 789 mm. Lägsta månadsmedelnederbörden erhölls i april (43 mm) och högsta i augusti (95 mm). Under november var medelvärdet 71 mm.

För 40-årsperioden 1881-1920 erhåller man en medelnederbörd på 817 mm och för 10-årsperioden 1911-1920 839 mm.

För intervallet 1931-1960 erhålls medelnederbörden 704 mm, med lägsta månadsmedelvärdet i mars (31 mm) och högsta i juli (84 mm). Under november var medelvärdet för denna period 66 mm.

Under intervallet 1945-1971 var medelnederbörden 710 mm och medelnederbörden för november var under intervallet 1945-1978 72 mm.

Som synes växlar nederbörden mycket mellan olika intervall och är även för långa observationsserier mycket olika.

Årsvärdena på nederbörden växlar också i hög grad från år till år. Under 1860-1923 erhölls en största nederbörd på 1183 mm år 1866 samt 528 mm som minsta nederbörd år 1921.

Statistisk beräkning av nederbörden i Säve

För perioden 1945-1978 har nederbördsuppgifter hämtats från SMHI 0705 station Säve i form av månadsvärden och årsvärden. Den period som bedömts vara viktig är höstperioden. Månaderna 8-11, 10-11, månad 11 och hela året har studerats. Dessa data har bearbetats statistiskt med avseende på medelvärde, standardavvikelse och snedhet samt fördelning.

För att en statistisk beräkning skall bli korrekt fordras att de enskilda värdena tillhör samma population och att inga förändringar i observationsbetingelser äger rum.

Ingen tendens till minskning eller ökning av nederbörden har kunnat konstateras så länge nederbördsstudier har pågått. Den årliga nederbörden synes vara statistiskt fördelad i tiden och kan vid hydrologiska beräkningar vanligen approximeras till någon sned fördelning såsom Pearsons frekvensfunktion typ III. Detta gäller speciellt vid korta (< 30 år) observationsserier. Vid mycket långa serier kan man ofta anse årsnederbörden vara normalfördelad.
För att bestämma sannolikhetsnivån eller plottningspositionen är Weibulls frekvensfunktion vanlig i hydrologiska sammanhang.

Genom kännedom om vilken fördelning som stickprovet tillhör kan en bedömning göras av sannolikheten för att ett visst värde underskrides eller överskrides.

Ett "stabilt" sannolikhetsvärde anses erhållas vid stickprov större än 30. Med hjälp av sannolikheten för en viss händelse kan återkomsttiden beräknas. Återkomsttiden anger med vilken tidsperiod som händelsen återkommer i medeltal. Med hjälp av en binomial-fördelning kan sannolikheten beräknas att en viss nederbörd skall inträffa under en speciell tidsperiod.

En "torr" resp "våt" period anger att nederbörden under perioden var mindre resp större än normalt (= sannolikhet 0,5).

Året

Data för hela året har studerats från Säve under perioden 1945-1971 (27 värden).

Det aritmetiska medelvärdet var 710 mm med en standardavvikelse på 118 mm för stickprovet. Den korrigerade snedheten är -0,05, vilket betyder att fördelningen approximativt är normalfördelad. Under perioden 1945-1971 var nederbörden 664 < $\bar{n}$ < 756 med 95 % sannolikhet uttryckt som medelvärde för perioden.

Extremvärden för perioden var 980 mm (1967) och 419 mm (1947). Nederbörden 980 mm beräknas överskridas 1 ggr på 25 år och 419 mm underskridas 1 ggr på 28 år.

Figur 13 visar sannolikheten för att en viss nederbörd underskrides.

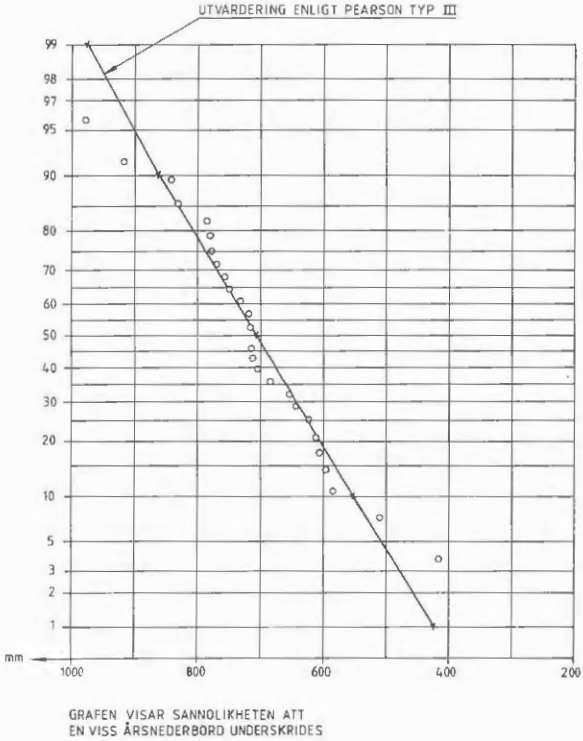


Fig 13

Studeras nederbörden 1976, 1977 och 1978 enligt normalfördelningen erhålles.

År	Nederbörd (mm)	Sannolikhet att värdet överskrides	Återkomsttid
1976	566	0,888	Underskrides 1 ggr på 8,9 år
1977	847	0,123	Överskrides 1 " " 8,1 "
1978	673	0,622	Underskrides 1 " " 2,6 "

Året 1976 var ett relativt extremt torrår vars värde 566 mm endast underskrides 1 ggr på 8,9 år. Det följande året 1977 var ett relativt extremt våtår vars värde överskrides 1 ggr på 8,1 år. Stora kontraster i nederbördsmängd speglar alltså dessa år. Skillnaden i nederbörd var 281 mm. Större skillnad mellan två närliggande år har bara åren 1946-1947 med 334 mm och då bör observeras att 1947 var ett extremt torrår.

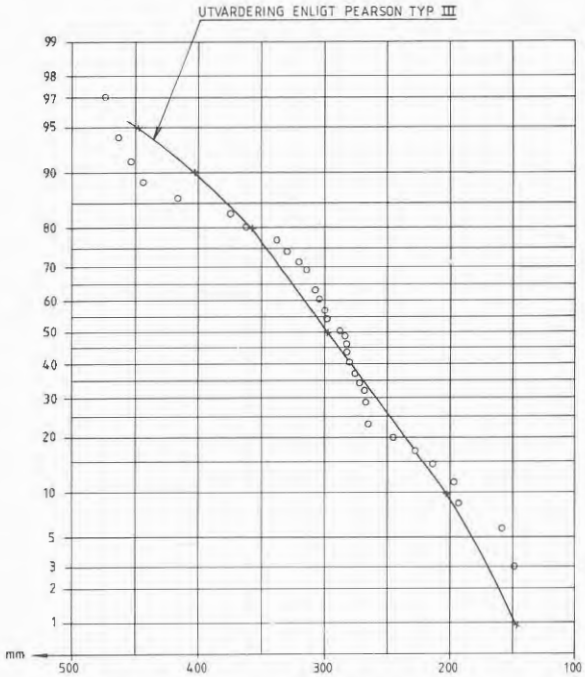
Genom extrapolation av anpassningskurvan Pearson typ III kan 10-årsregnet och 100-årsregnet beräknas till 861 mm respektive 984 mm.

Extremvärdet 1183 mm, som uppmättes år 1866, kan med ovan antagna fördelning uppskattas till en återkomst av 1 ggr på i medeltal mer än 10.000 år. Under denna tidsperiod har dock klimatförändringar och andra faktorer medfört att observationsbetingelserna ändrats och återkomsttiden är således inte relevant.
Det minsta värdet 419 mm (1947) beräknas i medeltal underskridas 1 ggr på 147 år.

Månaderna augusti - november

Data för månaderna augusti - november (fyra månader) har behandlats från intervallet 1945-1978 (34 värden) från samma station som ovan. Det aritmetiska medelvärdet var 301 mm med standardavvikelsen 81 mm. Den korrigerade snedheten var +0,30, vilket betyder att populationen avviker från normalfördelningen. Fördelningen Pearson typ III lämpar sig då bättre som underlag för utvärdering.

Figur 14 visar utvärdering enligt Pearson typ III med anpassad kurva efter fördelningens snedhet. Kurvan anger sannolikheten för att ett visst värde underskrides.



GRAFEN VISAR SANNOLIKHETEN ATT EN VISS NEDERBORD UNDER MÅNADER 8-11 UNDERSKRIDES

Fig 14

Studeras fördelningen enligt Pearson typ III erhålles:

År	Nederbörd månad 8-11 (mm)	Sannolikhet att värdet överskrides	Återkomsttid
1976	266	0,67	Underskrides 1 ggr på 3,0 år
1977	307	0,45	Överskrides 1 " " 2,4 "
1978	337	0,28	Överskrides 1 " " 3,6 "

Som visas hade 1976 en relativt torr höst (månad 8-11), som underskrides 1 ggr på 3 år. År 1977 hade en relativt normal höstnederbörd.

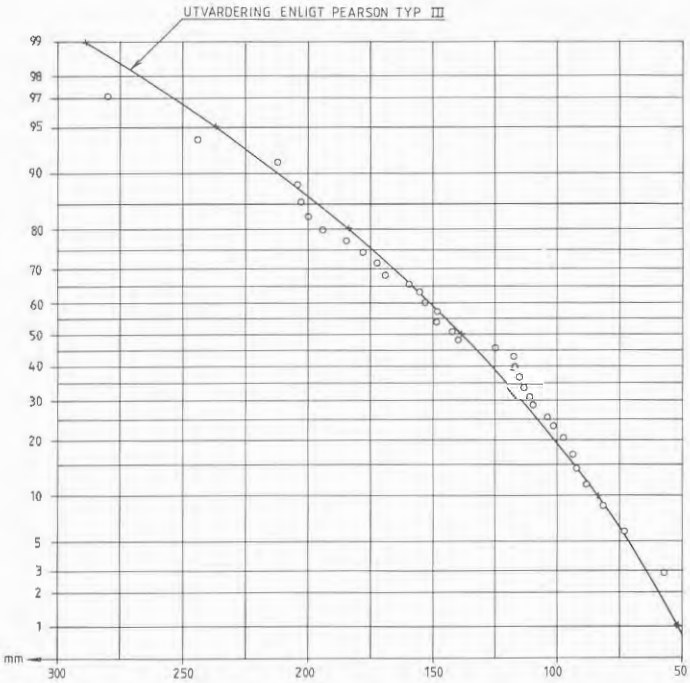
Inga anmärkningsvärda nederbördsförhållanden kan sägas ha förelegat under hösten (månad 8-11) 1977.

Månad oktober och november

Studeras ett ännu kortare tidsintervall på hösten, månad oktober och november, erhålls följande data för perioden 1945-1978.

Det aritmetiska medelvärdet är 114 mm med en standardavvikelse på 51 mm. Den korrigerade snedheten är +0,37, vilket innebär en avvikelse från normalfördelningen och att utvärdering enligt Pearson typ III är lämplig.

Figur 15 visar utvärdering enligt Pearson typ III. Grafen visar sannolikheten för att ett visst värde underskrides.



GRAFEN VISAR SANNOLIKHETEN ATT
EN VISS NEDERBÖRD UNDER MÅNADER
10 - 11 UNDERSKRIDES

Fig 15

Enligt Pearson typ III fås:

År	Nederbörd månad 10,11 (mm)	Sannolikhet att värdet överskrides	Återkomsttid
1976	204	0,12	Överskrides 1 ggr på 8,3 år
1977	200	0,14	Överskrides 1 ggr på 7,1 år
1978	102	0,79	Underskrides 1 ggr på 4,8 år

Månaderna oktober och november var relativt extrema våtmånader under såväl 1976 som 1977. Året 1976 var något mera sällsynt med en återkomsttid på 1 ggr på 8,3 år, jämfört med 1 ggr på 7,1 år för 1977. Inga av värdena är dock anmärkningsvärt höga.

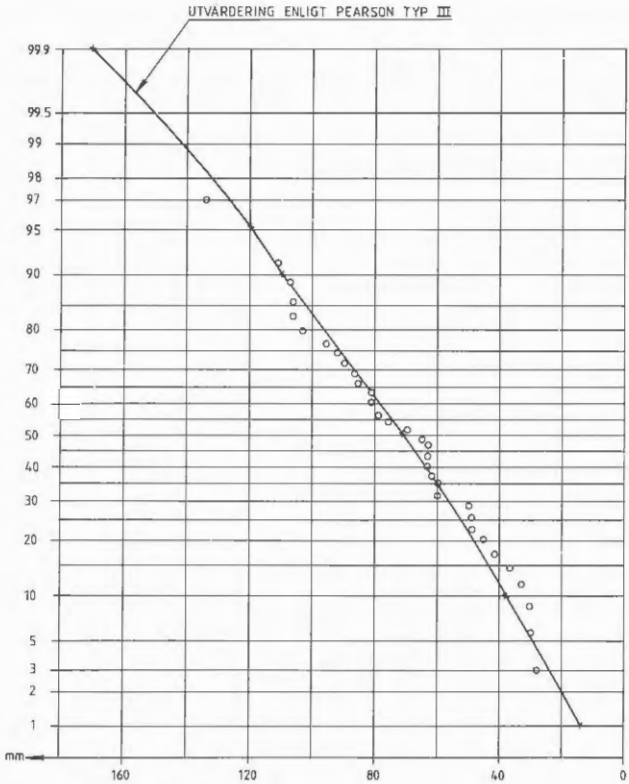
Inom parentes kan nämnas att 280 mm erhölls under oktober - november 1967 med en beräknad återkomsttid av 1 ggr per 77 år.

Månad november

Om enbart populationen novembermånaden studeras, dvs den månad då skredet inträffade (30/11 1977), fås följande statistiska data beträffande nederbörden.

Det aritmetiska medelvärdet för perioden 1945-1978 är 72 mm med standardavvikelse 28 mm. Den korrigerade snedheten är +0,14, dvs fördelningen avviker från normalfördelningen. Utvärdering enligt Pearson typ III ger då bättre överensstämmelse med stickprovets fördelning.

Figur 16 visar stickprovet utvärderad enligt Pearson typ III. Grafen visar sannolikheten att ett visst värde underskrides.



GRAFEN VISAR SANNOLIKHETEN ATT
EN VISS NEDERBÖRD UNDER MÅNAD
11 UNDERSKRIDES

Fig 16

Enligt Pearson typ III fås:

År	Nederbörd månad 11 (mm)	Sannolikhet att värdet överskrides	Återkomsttid
1976	103	0,13	Överskrides 1 ggr på 7,7 år
1977	120	0,05	Överskrides 1 ggr på 20 år
1978	70	0,50	Underskrides 1 ggr på 2 år

Som synes var november 1977 en extremt nederbördsrik novembermånad med en beräknad återkomsttid av 1 ggr per 20 år. Sannolikheten att en gång under en novembermånad erhålla mer än 120 mm under en period av 34 år bedöms enligt binomialfördelningen till 0,31. Under den studerade tidsperioden erhölls endast mera nederbörd under novembermånaden 1949 med 121 mm och 1963 med 134 mm.
Enligt binomialfördelningen är sannolikheten 0,58 att vi 1-2 ggr under en 34-årsperiod erhåller mer än 120 mm och 0,27 att vi exakt 2 ggr erhåller mer nederbörd under en annan novembermånad.

År 1979 erhöll november 163 mm vid stationen 7147 Säve. Sannolikheten att erhålla mer nederbörd en annan novembermånad är ca 0,002.

Av samtliga månader under året har november den minsta relativa avvikelsen från medelvärdet, dvs månad november har den mest "stabila" nederbörden, medan månaden mars har störst variation i nederbörd.

Om månadsnederbörden i november 1977 relateras till populationen "samtliga månader" perioden 1945-1979 (420 månader) visas att denna nederbörd 120 mm överstiges med en sannolikhet av 0,055, dvs en återkomsttid om 18 månader eller 1,5 år. Denna beräkning bygger dock på att flera populationer (månader) sammanslås, varför beräkningen endast kan användas som storleksjämförelse. Absolut sett var således november 1977 ej speciellt extrem. I relation till andra novembermånader var nederbörden dock extrem.

Dygnsnederbörd

För åren 1976 och 1977 har nederbörden studerats under månaderna augusti till december beträffande dygnsvärden.

År 1977 visar en mer kontinuerlig nederbörd under denna period än 1976. Under 1976 var nederbörden intensiv under 24 dagar från slutet av september till mitten av oktober med i medeltal 5,6 mm per dag. År 1977 var nederbörden 120 mm på 25 dagar i november, vilket betyder 4,8 mm i genomsnitt per dag.

Den stora nederbörden i november 1977 är betingad av ett kontinuerligt regnande denna månad.

Kommentar till den statistiska bearbetningen av nederbörden i Säve

Statistiken bygger beträffande månadsbearbetningen på ett relativt stort material för 1945-1978. Materialet kan därför anses vara signifikant för nederbördsförhållandena vid stationen i Säve.

Att överföra resultaten till annan plats kan inte utan vidare göras. De meteorologiska förhållandena skall i så fall vara helt identiska.

Emellertid kan det bedömas att meteorologiska förhållanden i Tuve, på grund av topografisk likhet och geografisk närhet, följer samma fördelning som i Säve men med möjligen något högre nederbörd i Tuve, vilket dock inte influerar på sannolikhetsfördelningen.

Det bör observeras att den statistiska bedömningen beträffande återkomsttid avser återkomsttid i medeltal under oändligt lång tid. Inget talar mot att två höga eller låga värden återkommer med kort tidsintervall, men i det långa loppet erhålls i medeltal motsvarande återkomsttid.

Genom att mätvärden före 1976 enbart funnits som månadsvärden har inget kunnat utläsas om större nederbördsmängder över månadsskiften. Intensiteten på nederbörden är därför inte helt klarlagd.

Sammanfattning

Statistisk bearbetning av nederbördsdata för åren 1945-1978 från SMHI Säve 0705 har utförts. Denna station ligger ca 4 km NV om Tuve. Syftet har varit att söka extremvärden på nederbörden under 1977 som kan ha bidragit till orsakerna för skredet.

Den erhållna sannolikhetsfördelningen gäller för den bearbetade nederbördsstationen men bedöms också gälla för Tuve och skredområdet. Möjligen har en något högre nederbörd erhållits vid Tuve. Nederbördspopulationen har utvärderats med kända fördelningar såsom normalfördelning och Pearson typ III-fördelning.
De studerade tidsperioderna är 1) hela året 2) månaderna augusti - november 3) månaderna oktober och november samt 4) månad november.

År 1977 var ett våtår med en beräknad överskriden nederbörd av 1 ggr på 8,1 år.

För månaderna augusti till november var 1977 ett relativt normalt år vilkets värde överskrides i medeltal 1 ggr på 2,4 år.

Månaderna oktober och november med relativt hög nederbörd under 1977 med en beräknad återkomsttid av 1 ggr på 7,1 år. Värdet var dock inte anmärkningsvärt högt jämfört med närliggande år som 1976.

Månad november 1977 hade en extremt hög nederbörd i förhållande till andra novembermånader, 120 mm, som endast beräknas överskridas 1 ggr på 20 år. Större nederbörd än i november 1977 erhölls i november 1949 respektive november 1963 om 121 mm respektive 134 mm. Nederbörden var relativt kontinuerlig under hela månaden.

Sannolikheten är 0,37 att en gång erhålla 120 mm nederbörd eller mer i november under en 15-årsperiod (t ex skredplatsens bebyggelsetid). Nederbörden 120 mm eller högre erhölls 18 ggr under perioden 1945-1979. Väntevärdet för detta enligt binomialfördelningen är 23 ggr.
Totalt sett hade november 1977 ingen extrem nederbörd. I förhållande till andra novembermånader var dock månaden extrem.

Nettonederbörd

Allmänt

Skillnaden mellan nederbörd och avdunstning benämnes nettonederbörd. För att beräkna den totala nettonederbörden erfordras kännedom om nederbörden samt storleken på den totala avdunstningen i området.

Avdunstningens storlek beror indirekt eller direkt av temperatur, vind, lufttryck, solinstrålning samt lösta ämnen i vattnet.

Förutom ovan angivna faktorer beror avdunstningen från en markyta även av jordart, kapillära egenskaper, markytans beskaffenhet, vegetationens art, grundvattenytans läge m.m. Lufttemperatur och vind anses vara de faktorer som är viktigast för beräkning av avdunstningens storlek. Vindens inflytande beräknas nå full effekt redan vid små värden på vindstyrkan (1-1,5 m/s) och således kan ingen ytterligare effekt väntas vid högre värden. (Ref J Johansson: Hydrogeologiska undersökningar inom nya komplexet Komossen rapport 3:17 Kungliga Tekniska Högskolan, sektionen för Lantmäteri, institutionen för kulturteknik, Stockholm 1974.)

Det finns ingen helt tillförlitlig metod att beräkna avdunstningen. O Tamm har, med hjälp av data om årsmedelnederbörd, årsmedelavrinning och årsmedeltemperatur mellan åren 1921 och 1950, uppskattat den totala årsavdunstningen till $E = 220,9 + 30,4\ T$ där T är årsmedeltemperaturen. För beräkning av avdunstningen under kortare tid än år har F. Bergsten uppställt ett samband mellan månadsmedeltemperatur och avdunstning. F. Bergsten har utfört beräkningar av den totala avdunstningen genom vattenbalansstudier och redovisat ett samband mellan månadsavdunstningen inom Viskans flodområde och månadsmedeltemperaturen i Borås enligt figur 17.

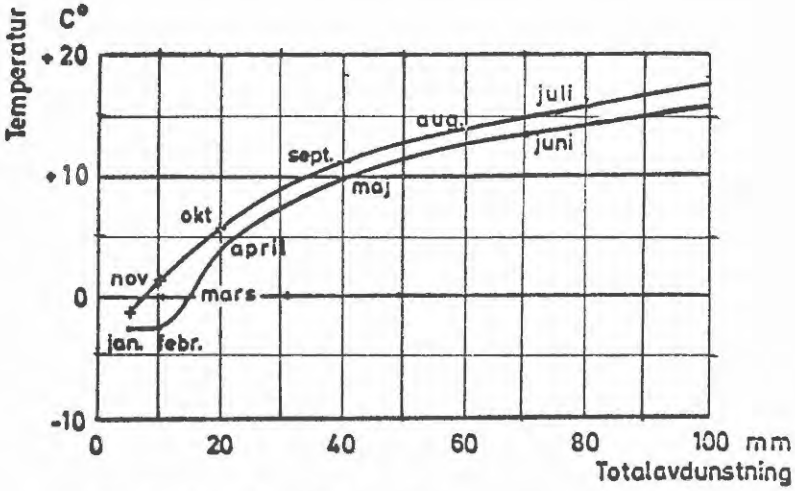


Fig 17 Samband mellan månadsmedeltemperatur i Borås och total avdunstning i Viskans flodområde under normala förhållanden (Bergsten 1950).

Korrelationen mellan Tamms formel och Bergstens samband har redovisats som god beträffande avdunstningen i medeltal per år, även för andra platser än undersökningsområdet. (Ref K Nygårds, J Perers, Hydrogeologisk undersökning av Badelundaåsen vid Hedemora, Kopparbergs län. CTH, institutionen för geologi, examensarbete 1970.)

Att avdunstningen per månad i absoluta tal är den korrekta är svårt att bedöma, men vid studier av års- såväl som månadsavdunstningen torde Bergstens diagram kunna användas med acceptabel tillförlitlighet.

Nettonederbörd i göteborgstrakten

Med hjälp av nederbördsdata från SMHI station 0704 i Säve och månadsmedeltemperatur från Torslanda, Göteborg station 7142 och Göteborg station 0706, har total avdunstning E kunnat uppskattas för varje månad under perioden 1972-1978 med hjälp av Bergstens samband.

För hela året under perioden 1972-1978 erhålls följande data:

År	Medeltemperatur Göteborg (^oC)	E_{Tamm} (mm)	$E_{Bergsten}$ (mm)
1972	8,04*	467	466
1973	8,21	472	490
1974	8,81	490	496
1975	9,28	505	553
1976	7,58	453	468
1977	7,39	448	485
1978	6,89	432	487
	$\bar{t} = 8,03^oC$	$\bar{E}_{Tamm} = 466$ mm	$\bar{E}_{Bergsten} = 492$ mm

* Uppskattat värde p g a ofullständiga data.

Som synes ger Tamms formel ca 5 % mindre avdunstning än Bergstens samband. Bergsten anser att beräknat värde på avdunstningen enligt hans metod för säkerhets skull bör ökas med 10 % eftersom undersökningen utfördes under en period med tämligen kalla somrar, dvs $\bar{E}_{Bergsten}$ erhålles till 540 mm. Om Bergstens och Tamms formler kan anses vara relativt oberoende synes ca 500 mm vara ett bra medelvärde på avdunstningen per år under denna period i göteborgstrakten.

För beräkning av avdunstningen per månad har Bergstens samband använts okorrigerat. Möjligen underskattas avdunstningen under juli och augusti. Följande avdunstning erhålles:

Tabell 1.

M å n a d (mm)												
År	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1971	15	15	17	24	50	95	100	80	43	32	15	16
72	0	15	18	24	52	70	100	85	38	28	20	16
73	15	18	24	24	48	90	100	85	46	22	10	8
74	16	18	17	34	48	83	83	85	55	23	18	16
75	22	16	18	24	54	90	100	100	64	32	17	16
76	0	15	0	25	48	93	100	100	42	26	19	0
77	0	0	17	19	48	100	100	100	42	32	17	10
78	5	0	15	23	48	95	95	95	38	32	22	0

Nederbörden var under perioden vid SMHI station i Säve 0705:

Tabell 2.

M å n a d (mm)												
År	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1971	63	33	62	43	32	72	71	119	88	67	89	40
72	28	20	29	70	97	104	109	36	20	31	63	98
73	69	53	18	64	54	26	24	64	75	35	92	75
74	79	42	19	0	28	34	52	66	149	54	106	87
75	104	7	20	42	37	23	106	39	117	41	76	48
76	47	22	19	21	51	29	16	7	55	101	103	95
77	98	48	81	83	42	66	69	14	93	80	120	53
78	41	29	118	15	20	58	29	108	127	32	70	26
Medel-värde	66	32	46	44	45	52	60	57	91	55	90	62
Medel-värde 1945-1978	58	37	38	44	45	52	66	77	77	72	72	66

Nettonederbörden erhålles som nederbörden minus avdunstningen:

Tabell 3.

M å n a d (mm)													
År	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Året
1971	48	18	45	19	-18	-23	-29	19	45	35	74	24	+257
72	28	5	11	46	45	34	9	-49	-18	3	43	78	+235
73	54	35	-6	40	6	-64	-76	-21	29	13	82	67	+159
74	63	24	2	-34	-20	-49	-31	-19	94	31	88	71	+220
75	104	-8	2	18	-17	-67	6	-61	53	9	59	32	+130
76	47	7	19	-4	3	-64	-84	-93	13	75	84	95	+98
77	98	48	64	64	-6	-34	-31	-86	51	48	103	43	+362
78	26	29	95	-8	-28	-37	-66	13	89	0	48	26	+187
Medel-värde	+59	+20	+29	+26	-4	-38	-38	-37	+45	+27	+73	+55	+206

Av tabell 3 framgår att nettonederbörden varierar mycket under året och mellan åren.

Under året erhålls i regel negativ nettonederbörd under månaderna maj - augusti vilket innebär att inget nettotillskott av vatten tillkommer grundvattenmagasinen. I stället sker en minskning av magasinens vattenvolym genom avrinning. Under resten av årets månader med positiv nettonederbörd sker en påfyllning av magasinen.

Vid perioder med tjäle och snö sker dock en ackumulation av nettonederbörden, vilken efter blidväder frigörs.

Av tabell 3 framgår att nettonederbörden under november månad är störst och under juni och juli tillsammans med augusti är minst.

Mellan åren varierar nettonederbörden kraftigt. Speciellt gäller detta under sommarmånaderna. För årsvärdena noteras att 1976 var ett extremt torrt år med endast 98 mm nettonederbörd. Påföljande år 1977 erhöll däremot en extremt hög nettonederbörd om 362 mm.

Betraktas perioden 1971-1978 uppnåddes den största ökningen i nettonederbörd mellan augusti och september 1975 till 114 mm/månad och augusti - september 1977 till 137 mm/månad.

Den största nettonederbörden under en månad uppnåddes i november 1977 (+ 103 mm) tillsammans med januari 1975 (+ 104 mm) under hela perioden 1971 - 1978.

Det bör observeras att denna observationsserie för nettonederbörden 1972 - 1978 är alltför kort för att ligga till grund för en sannolikhetsbedömning.

Betraktas endast den positiva nettonederbörden för höstarna 1971-78 t.o.m. november fås:

År	Positiv nettonederbörd (mm)
1971	+ 173
1972	+ 46
1973	+ 124
1974	+ 213
1975	+ 121
1976	+ 172
1977	+ 202
1978	+ 150

Höga värden erhölls 1974 och 1977 samt låga 1972.

Jämföres nettonederbörden under juni - december 1976 - 1978 finner man att nettonederbördens amplitud var störst under 1976 från - 93 mm (augusti) till + 95 mm (december) se fig 18. Övergången från negativ nettonederbörd under sommarmånaderna till positiv under höstmånaderna skedde dock hastigast för år 1977 under dessa tre år.

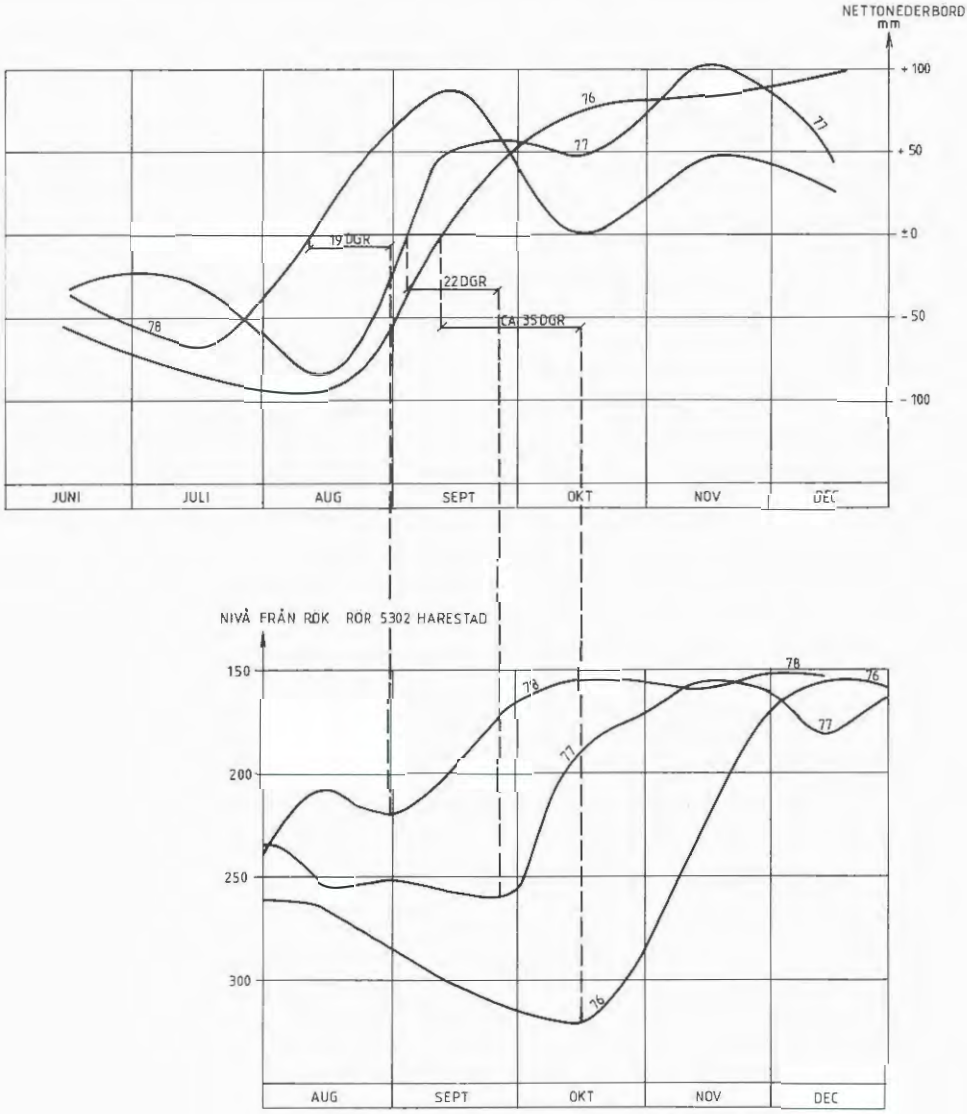


Fig 18

Sammanfattning

Med hjälp av nederbördsdata från SMHI Säve station 0705, temperaturer från olika stationer i göteborgstrakten, har nettonederbörden beräknats månadsvis 1971 - 1978. Ett samband uppställt av F Bergsten 1950 har härvid använts. Det beräknas ge en relativt god uppskattning på nettonederbörden varje månad.

Under denna tidsperiod befanns år 1977 ha erhållit relativt stor nettonederbörd +362 mm och 1976 relativt låg nettonederbörd +98 mm. För enskild månad i perioden 1971 - 1978 var november 1977 exeptionell tillsammans med januari 1975 beträffande hög nettonederbörd.

Stor ökning av nettonederbörden skedde augusti till september 1977, se fig 18.

Nederbörd och nettonederbörd i Tuve november 1977

Under november 1977 föll i Tuve en hög, relativt kontinuerlig nederbörd om ca 120 mm (Säve SMHI 0705). Denna nederbörd beräknas överskridas i medeltal 1 ggr på 20 år i förhållande till övriga novembermånader och 1 ggr på 1,5 år i förhållande till övriga månader.

Inga andra markerade extremvärden beträffande nederbörden under hösten 1977 kan urskiljas.

För tidsperioden 1971 - 1978 var den totala nettonederbörden störst 1977. Relativt stor positiv nettonederbörd erhölls hösten 1977.

Den största nettonederbörden under en månad uppnåddes i november 1977 tillsammans med januari 1975.

Grundvattennivåer

Nettonederbördens fördelning på ytavrinning och grundvattenbildning är beroende av markytans topografi och råhetsgrad, vegetationsförhållanden, markmaterialets genomsläpplighet, uppdämningsförhållanden etc.

En del av nettonederbörden bildar grundvatten och når grundvattenmagasinet. Grundvattennivåns variation är bl a beroende av nederbördsområdets storlek, magasinets egenskaper, klimatologiska faktorer, markmaterialets genomsläpplighet och magasinerande förmåga. Beroende på dessa faktorer uppstår en viss fasförskjutning mellan nettonederbörden och grundvattennivåns förändring. Denna fasförskjutning kan uppgå till flera månader men kan också vara helt obetydlig.

Grundvattennivån i göteborgstrakten

Uppgifter saknas om grundvattennivåer i Tuve innan skredet 1977. Istället har områden sökts där nivåobservationer har utförts och där området har likartade hydrogeologiska betingelser.

Sveriges Geologiska Undersökningar (SGU) har sedan 1971 bedrivit mätningar i Harestad, Härskogen och Sandsjöbacka utanför Göteborg. Dessa stationer tillhör Göteborgs grundvattenkors och kan betraktas som en referensstationer för grundvattennivån under ostörda förhållanden inom skilda geologiska miljöer i göteborgstrakten.

Nivåförändringen i Harestad har p.g.a. likartade hydrogeologiska betingelser bedömts vara snarlik den i Tuve, varför Harestad ansetts vara lämplig som referensstation och korrelationsobjekt beträffande kopplingen mellan nederbörd och grundvattennivåförändring.

Stationen Harestad består av 13 observationsrör med spetsarna drivna i friktionsmaterial överlagrat av lera. Mätningar har skett 2 ggr per månad i varje observationsrör sedan 1971.

Observationerna har av SGU sammanställts och redovisas för ett representativt rör under tidsperioden 1971 - 1979 fig 19. Denna nivå representerar magasinets nivåvariation under perioden.

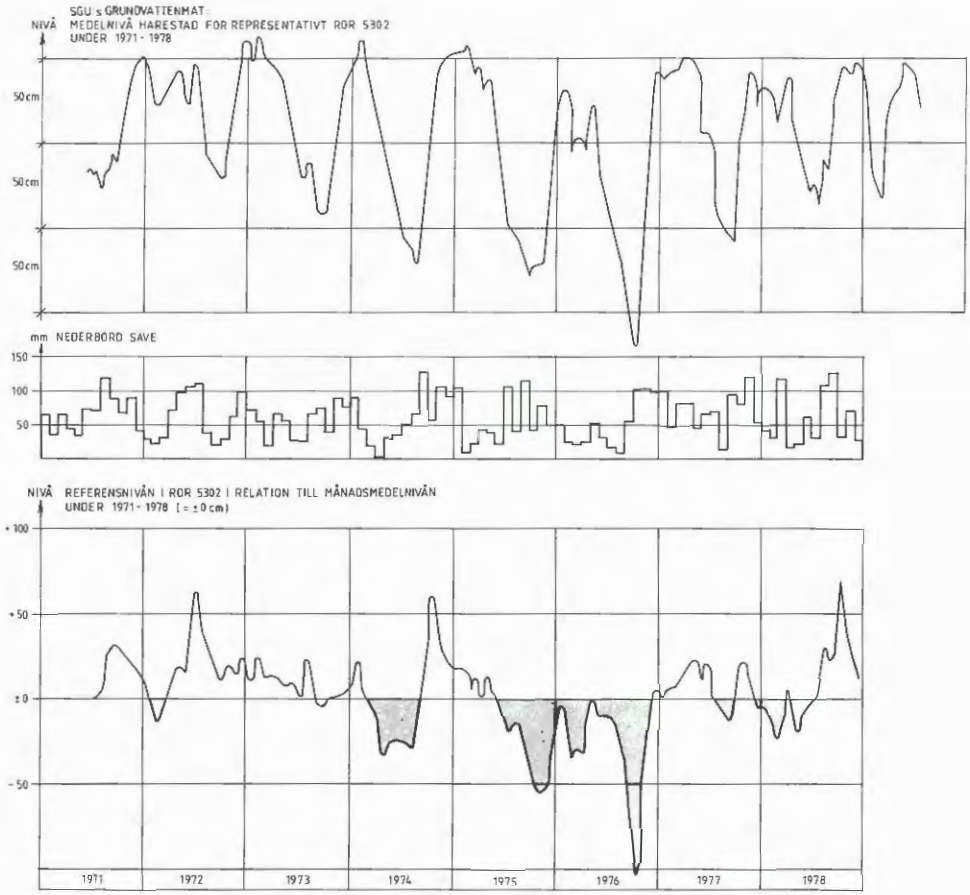

SGU s GRUNDVATTENNÄT
NIVÅ MEDELNIVÅ HÄRESTAD FÖR REPRESENTATIVT RÖR 5302
UNDER 1971 - 1978
50 cm
50 cm
50 cm
mm NEDERBÖRD SÄVE
150
100
50
NIVÅ REFERENSNIVÅN I RÖR 5302 I RELATION TILL MÅNADSMEDELNIVÅN
UNDER 1971 - 1978 (= ± 0 cm)
+ 100
+ 50
± 0
- 50
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978

Fig 19

Amplituden på grundvattennivåns variation är i allmänhet c:a 1 m med högst nivå under vår och höst. Den största totala amplituden är 1,86 m under perioden.

Förändringen i nivå är relativt typisk för områden med morän överlagrad av lera. Endast en förhållandevis liten infiltrerad vattenmängd behövs för att ändra tryckförhållandena i magasinet. Magasinet kan alltså sägas vara relativt känsligt för yttre förändringar i tillflöde och avrinning.

Höga grundvattennivåer i referensröret noterades vid årsskiftet 1972-1973, 1973-1974 och 1974-1975. Lägsta grundvattennivå erhölls i oktober 1976.

Korrelation mellan grundvattennivån i Harestad och nettonederbörden

Som tidigare nämnts råder en fasförskjutning mellan (netto-) nederbörden och dess påverkan på grundvattenmagasinet. Genom att plotta magasinets nivå och nettonederbörden i diagram med samma tidsdelning kan dessa två grafer förskjutas efter tidsaxeln till bästa överensstämmelse erhålles för att undersöka fasförskjutningens storlek. En lämpligt vald höjdskala på någon av parametrarna underlättar anpassningen i höjdled. I vårt fall motsvaras 50 cm nivåförändring av 50 mm nettonederbörd.

På fig 20 har korrelationen mellan grundvattennivån för referensröret i Harestad och nettonederbörden i göteborgstrakten redovisats.

Kurvorna har anpassats till varandra genom identifikation av extremvärden tills bästa samstämmighet uppnåtts.

Mycket god överensstämmelse för hela perioden 1971-1979 erhålles mellan kurvorna med ca 1,5 månads fasförskjutning mellan nettonederbörd och grundvattennivå. Av ritningen framgår också att fasförskjutningens storlek minskar ju högre sommarminiminivån är, dvs en redan hög nivå i ett magasin under sommaren påverkas hastigare av nederbörd. Detta gäller även under hösten när magasinen fylls på. Ett regn påverkar ett magasin hastigare om magasinet är uppfyllt.

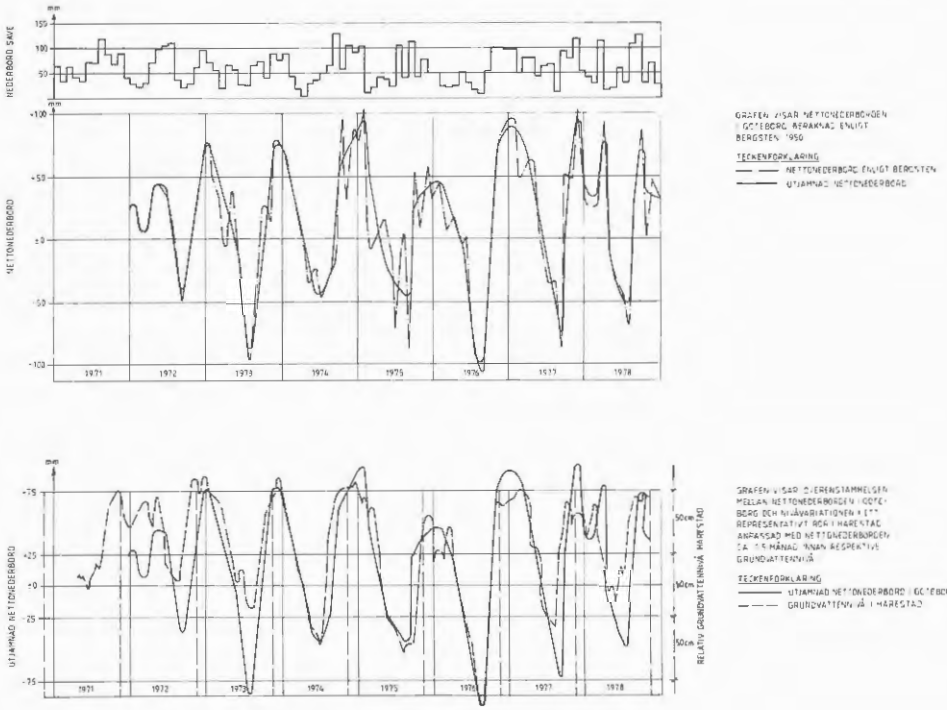


Fig 20

Fig 18 visar grundvattennivån under hösten 1976, 1977 och 1978 samt nettonederbörden under samma period. Av kurvorna framgår att fasförskjutningen mellan tidpunkten för övergång till positiv nettonederbörd och motsvarande nivåhöjning är 19 dagar, 22 dagar och 35 dagar för 1978, 1977 och 1976, med kortast tidsförskjutning (19 dagar) för 1978 med högst nivå under sommaren och längst tidsförskjutning (35 dagar) för 1976 med lägst nivå under sommaren.

Den beräknade nettonederbördsfördelningen enligt Bergsten för göteborgstrakten kan således mycket väl överföras på motsvarande grundvattennivåförändring i Harestad, vilket är ett kvalitativt mått på nettonederbördsberäkningen. Härvid kan den beräknade nettonederbörden anses som representativ också för Tuve.

Statistisk bearbetning av grundvattennivådata i Harestad

Grundvattennivån för ett representativt rör 5302 i Harestad har studerats för början och slutet av november under tidsperioden 1971-1978.

Sannolikheten för att erhålla högre grundvattennivå än början av november 1977 bedöms för stickprovet (1/11 1971-1978) vara 0,38 med utvärdering enligt Pearson typ III med en korrigerad snedhet av 0,81.

Sannolikheten för att erhålla högre nivå än slutet av november bedöms för stickprovet (30/11 1971-1978) till 0,56 enligt Weibull. En stor korrigerad snedhet om 1,75 medgav ej utvärdering enligt Pearson typ III.

Grundvattennivån i början respektive slutet av november 1977 överskrides i medeltal 1 ggr på 2,6 år respektive 1,8 år.

Någon extremt hög nivå existerade således inte under november 1977 i förhållande till andra novembermånader 1971-1978.

Det bör poängteras att den lilla populationen om 8 värden minskar bearbetningens användbarhet i fråga om sannolikhetsbedömningar men att den i alla fall bör ge en uppskattning av nivåns frekvens.

För alla mätningar som gjorts i Harestad under tiden 18 juni 1971 - 16 juni 1979 (174 värden) är sannolikheten att erhålla högre nivå än i början av november 1977 0,34 och 0,26 beträffande slutet av november 1977, utvärderat enligt Weibull.

Sannolikhetsbedömning av meteorologiska förhållanden

Som redan konstaterats erhölls stor nederbörd i Säve under november 1977. Nettonederbörden var också stor denna månad.

Genom att kopplingen mellan (netto-) nederbörd i göteborgstrakten och grundvattennivåförändringen i ett magasin i Harestad existerar med god korrelation bör också denna koppling finnas beträffande magasinet i Tuve, möjligen med undantag för fasförskjutningens belopp.

I Harestad var grundvattennivån under november ej extremt hög. Perioder med högre nivåer har förekommit såväl under november som övriga delar av året.

Därför bör följaktligen perioder med högre nivåer än i november 1977 ha existerat också i magasinet i Tuve, under förutsättning att novembernivån ej var identisk med bräddnivån för magasinet. En hypotes är då att (netto-) nederbörden under november har varit av större betydelse än grundvattennivån för den klimatologiska bedömningen av skredets orsaker.

För en relativt normal grundvattennivå under början av november skulle då ett stort novemberregn medföra en hastig uppbyggnad av trycknivån i magasinet till bräddnivån.

För att bedöma denna hypotes kan tillfällen med både hög nettonederbörd och högre grundvattennivå än november 1977 studeras.

Som visats tidigare är fasförskjutningen beroende på uppfyllnadsnivå varför (netto-)nederbörden snabbt påverkar ett magasin vid hög nivå.

I följande tabell redovisas tidpunkter med, relativt nivån den 30 november 1977, hög nivå i referensröret i Harestad, aktuell nederbörd månaden innan denna tidpunkt samt kvoten mellan nederbörd och medelnederbörd respektive nettonederbörd och medelnettonederbörd för månad. Kvoterna kan sägas visa hur extrema förhållandena var jämfört med normala betingelser.

Tidpunkt för nivå	Nivå fr. rök (cm)	Nederb. N (mm)	Medel-nederb. N (mm)	$N/\bar{N}$	Netto-nederb. Nn (mm)	Medelnetto-nederb. Nn (mm)	$N/\bar{N}n$
711111	-153	89	72	1,24	74	73	1,01
711216	-144						
721211	-139	98	66	1,48	78	55	1,42
740201	-139	79	58	1,36	63	59	1,07
740215	-140						
741203	-148	106	72	1,47	88	73	1,21
741216	-148						
741230	-145	87	66	1,32	71	55	1,29
750113	-147						
750204	-143	104	58	1,79	104	59	1,76
770331	-148	81	38	2,13	64	29	2,21
771131	-162	120	72	1,67	103	73	1,41

Av tabellen framgår att vid två tidigare månader har grundvattennivån varit högre samtidigt som kvoten mellan aktuell (netto-) nederbörd och medel-(netto-) nederbörd varit större än i november 1977. Dessa månader är januari 1975 och mars 1977.

Betingelserna under dessa två månader var således mer sällsynta beträffande kombinationen hög grundvattennivå och högre nettonederbörd än normalt jämfört med november 1977.

(I januari 1975 föll nederbörden i huvudsak som regn och marken var mestadels snöfri. Medeltemperaturen var +4,5°C. För årstiden relativt goda förhållanden rådde för infiltration av nederbörden.

Under mars 1977 föll nederbörden också såsom regn och ett ringa snötäcke existerade i början av månaden. Medeltemperaturen för månaden var 2,4°C. Relativt goda förhållanden för infiltration av nederbörd gällde också denna månad.)

Det som skiljer november 1977 ifrån januari 1975 och mars 1977 är högre absolut nederbörd och högre absolut nettonederbörd i november 1977. Trycknivåerna för Harestadmagasinet i januari 1975 och mars 1977 var båda högre än för november 1977. Dessutom hade respektive månad en mer extrem nederbörd än november 1977.

Magasinet i Tuve hade därför troligen redan med november 1977:s relativt normala grundvattennivå legat nära bräddnivån i magasinet och att ytterligare nederbörd ej höjde grundvattennivån utan bräddade av från magasinet. En extremt stor nettonederbörd skulle därigenom anstränga bräddningsförmågan hos magasinet. Fasförskjutningen mellan bräddningstidpunkten och nederbörden som orsakade denna bräddning torde därför vara liten.

Statistisk bearbetning av kombinationen hög grundvattennivå och hög nederbörd

Av det tidigare framgår att perioder med såväl högre grundvattennivå som relativt hög nederbörd har funnits i jämförelse med november 1977.

Händelserna "hög grundvattennivå" och "hög nederbörd" kan inte sägas vara oberoende och därmed är det oegentligt att betrakta produkten av händelsernas sannolikhet, händelsen "hög grundvattennivå och hög nederbörd", såsom den samlade sannolikheten för att både hög grundvattennivå och hög nederbörd skall inträffa.

Denna produkt utgör dock ett bra relativt jämförelsetal för den kombinerade händelsens sannolikhet.

I följande tabell redovisas denna produkt för de intressanta tidpunkterna.

Sannolikhetsbedömningen av nivån bygger på hela populationen om 174 mätningar sedan 1971, medan sannolikhetsbedömningen beträffande nederbörden baseras på månadsnederbörd en månad tidigare än nivåmätningen under perioden 1945-1979, i förhållande till alla månader (420 månader).

Av tabellen framgår att den relativa sannolikheten för händelsen "hög grundvattennivå och hög nederbörd" för alla tidpunkter med undantag för november 1971 var lägre än för november 1977, vilket innebär att de rådande förhållandena med nederbörd och grundvattennivå var mer extrema än för motsvarande under november 1977.

Tidpunkt	Sannolikhet enligt Weibull att nivån överskrides	Sannolikhet enligt Pearson typ III att nederbörden överskrides	Produkt
711111	0,131	0,17	0,0223
721211	0,014	0,11	0,0015
740201	0,014	0,24	0,0034
741203	0,057	0,09	0,0051
741230	0,040	0,18	0,0072
750204	0,029	0,09	0,0026
770331	0,057	0,21	0,0120
771131	0,257	0,055	0,0141

Betraktas t ex november 1974 finner man att nederbörds- och grundvattennivåbetingelserna var mer extrema i förhållande till november 1977. November 1974 hade högre nivå men lägre nederbörd än november 1977. Eftersom skredet inte inträffade under november 1974 bör nederbörden ha haft större betydelse än grundvattennivån för utlösandet av skredet, genom att bräddnivån i magasinet snart uppnåtts.

Sammanfattning av hydrometeorologiska data

November månad 1977 hade en extremt hög novembernederbörd. (Sannolikheten för att värdet överskrides uppgår till 0,05.) Större nederbördstal har dock registrerats från november 1949 och november 1963 och för övriga månader 18 gånger under perioden 1945-1979.

Under perioden 1971-1978 erhölls störst nettonederbörd under år 1977. Störst månadsnettonederbörd erhölls i november 1977 och januari 1975. I januari 1975 föll nederbörden i form av regn. Medeltemperaturen var +4,5°C.

Grundvattennivån i Harestad var under november 1977 ej exceptionellt hög jämfört med andra novembermånader. Studeras alla mätvärden 1971-1979 är sannolikheten att erhålla högre nivå 1/11 0,34 och 30/11 0,26.

Fasförskjutningen mellan grundvattennivåförändring i Harestad och nettonederbörd i göteborgstrakten är beroende på uppfyllnadsgrad i magasinet. Hög uppfyllnadsgrad innebär liten fasförskjutning.

Tidpunkter har funnits då vi haft en såväl högre grundvattennivå i Harestad som tillfälle med mer extrem (netto-) nederbörd, men troligen icke tillfällen med högre absolut nederbörd och högre grundvattennivå. Detta innebär att grundvattenmagasinet är fyllt och att ytterligare nederbörd avbördas som ytvatten.

MODELLSTUDIE AV GRUNDVATTENMAGASINET

FEM-analys

Med en modellstudie avses normalt ett försök att efterlikna verkligheten med en matematisk modell.
Effekten av olika ingrepp i grundvattenmagasinet skall med hjälp av modellen kunna prognostiseras.

I detta fall är avsikten att belysa grundvattenmagasinets reaktionskänslighet för nybildning samt hur tryckuppbyggnaden sker vid tillförsel av vatten.
Programmet som utnyttjats finns lagrat på Göteborgs Datacentral och betecknas GEOFEMG, vilket ingår i CHALMFEM-biblioteket.

Programmet arbetar efter principen för finita elementmetoden.

Finita elementmetoden bygger på en lösning av differentialekvationen för grundvattenflöde inom begränsade delar av grundvattenmagasinet, finita element. I GEOFEM-G användes den tvådimensionella formen:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)_y + \frac{\partial}{\partial y}\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = S\frac{\partial h}{\partial t} + W$$

För varje element måste således indata ges för transmissivitet, T_x och T_y, magasinskoefficient, S, och grundvattenbildning, W. Dessa måste vara konstanta inom elementen, men kan variera fritt mellan dessa. Dessutom måste uttag och infiltrationsmönster samt randvillkor anges.

Elementnätet är i GEOFEM-G uppdelat i ett i princip rektangulärt mönster. Fyrhörningarna behöver inte ha raka sidor utan kan ges relativt fri form, se figur 21.

Analysen kan utföras både för stationära förhållanden och transienta förlopp. Resultatet ges i form av grundvattennivåer för hörnnoderna.

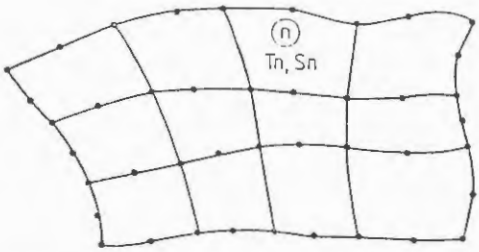


FIG 21. EXEMPEL PÅ ELEMENTNÄT

En optimering av en FEM-modell måste ske i flera steg. Utgångsdata är den bild av geologin som erhållits från borrningar och geologisk kartering av området. Som ett första steg upprättas ett elementnät som är så beskaffat att indelningen är tät i de områden där stora nivåförändringar förväntas, dvs intill brunnen, eller där geologin förändras snabbt inom en begränsad sträcka. Om möjligt anslutes elementgränserna till en förenklad karta över de geologiska förhållandena.

Optimeringen bör sedan utföras mot pumpningsdata och bör omfatta successivt längre tidsförlopp. Orsaken till detta är att en pumpning genom avsänkningstrattens utbredning ger information från allt större akvifervolymer. Man kan således bestämma egenskaperna från brunnen och utåt. Som en avslutning kan sedan randvillkoren bestämmas med stationära modeller mot en längre tids infiltration eller uttag. Modelloptimeringen är således en omfattande process, som kan kräva ett stort antal delmodeller för att ett gott resultat skall erhållas.

Modell över Tuve

Elementnät och egenskapsområde

Det område som studerats framgår av fig 22 . Området har indelats i rektangulära element. Verklighetens topografi och geologi illustreras grovt i modellen, raka sidor osv. Utmed norra, västra och södra sidan har en rand med stor magasinskoefficient anbringats för att efterlikna de naturliga infiltrationsytorna. Utmed samma randområden tillförs även nybildningen. Den östra sidan betraktas som den dränerande delen.

För att slippa tilldela varje element speciella egenskaper, något som det dessutom inte finns data för, brukar man sammanföra element med samma egenskaper till egenskapsområden. En sådan indelning för den slutliga modellen redovisas i figur 22.

Kalibrering av modellen

Av resultaten från provpumpningarna framgår att det naturliga grundvattenflödet i skredområdet är av storleksordningen 20-30 l/min, vilket för modellens area motsvarar en nederbörd av 35 mm/år. Detta är relativt lite, jämfört med nettonederbörden, som kan beräknas till ca 200 mm/år för SMHI:s station i Säve.

Med en nybildning av 25 l/min erhålls en tryckfördelning av grundvattnet vid stationära förhållanden enligt fig 23 . Denna bild skall jämföras med fig 10A och 10B. som visar nivåerna direkt efter skredet och vid årsskiftet 1979-80. Överensstämmelsen får anses vara tillfredsställande.

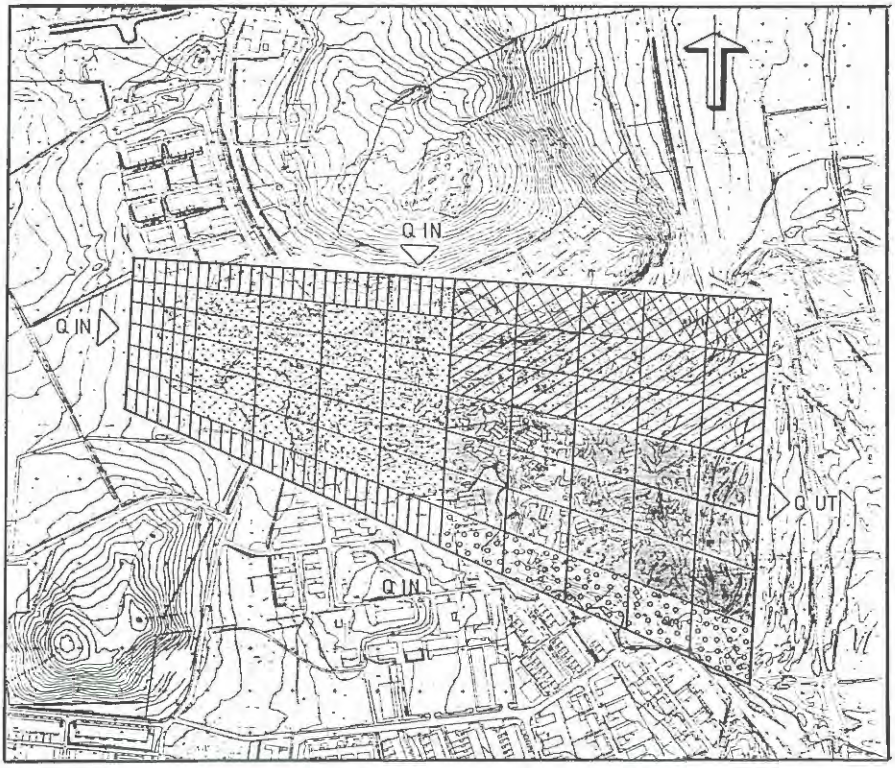


Fig 22

FIG ELEMENTNÄT MED EGENSKAPSOMRÅDEN

$T = 3 \cdot 10^{-5}$ $S = 2 \cdot 10^{-4}$ $P'/m' = 8 \cdot 10^{-9}$

— " — $S = 7 \cdot 10^{-2}$ — " —

$T = 5 \cdot 10^{-5}$ $S = 2 \cdot 10^{-4}$ $P'/m' = 2 \cdot 10^{-9}$

— " — $S = 7 \cdot 10^{-2}$ — " —

$T = 2 \cdot 10^{-5}$ $S = 2 \cdot 10^{-4}$ $P'/m' = 2 \cdot 10^{-9}$

— " — $S = 7 \cdot 10^{-2}$ — " —

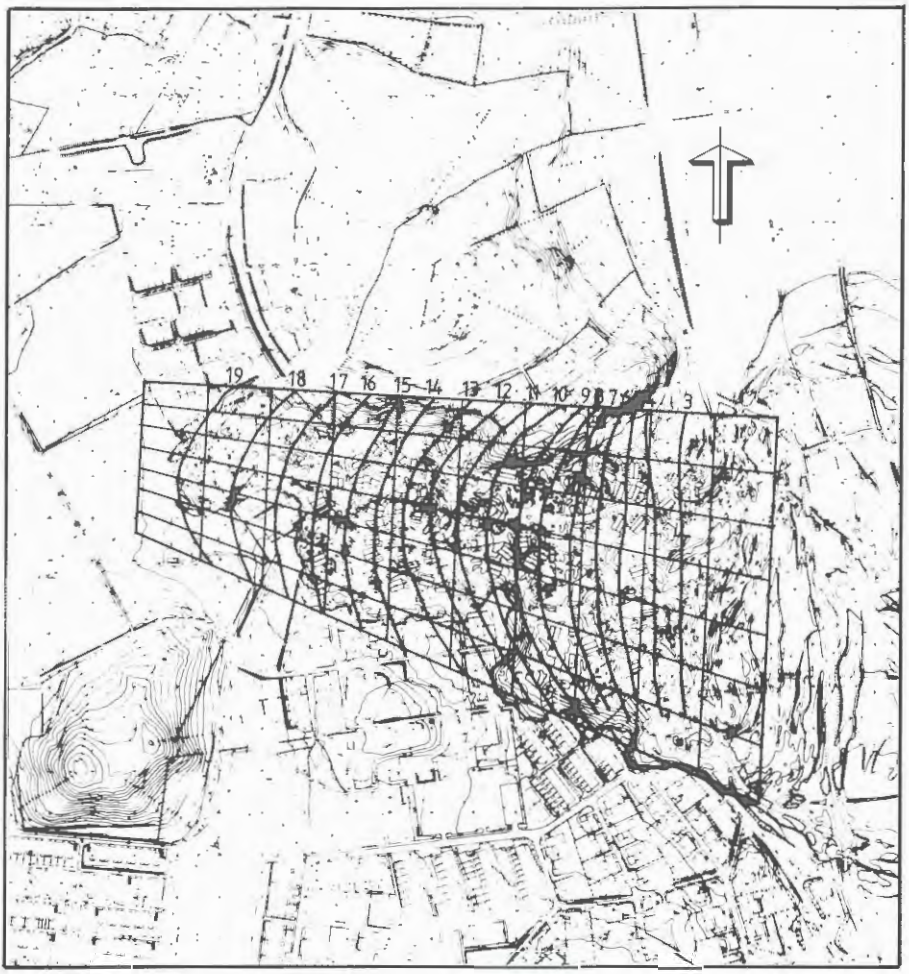


FIG. 23 REL. GRUNDVATTENNIVÅER ENL. MATEMATISK MODELL

Tillämpning av modellen

För att studera effekten av nederbörden i november 1977 har nybildningen för denna månad uppskattats genom proportionering mellan årsmedelnettonederbörden och novembers verkliga nettonederbörd.

En transient studie av förhållandena visar att magasinet mycket snabbt reagerar på tillförd vattenmängd. Detta verifieras delvis av att trycknivåbilden direkt efter skredet och fram till idag är förhållandevis identisk, om man frånräknar effekter från utförda tätningsarbeten. Magasinets nya vattenbalanssituation utbildades således mycket hastigt.

Magasinet kan sägas fyllas hastigt varefter bräddning vid dalsidorna inträder.

Den infiltrerade vattenmängd som krävs för fyllning av magasinet är liten jämfört med de nederbördsmängder som diskuterats tidigare, oberoende av utgångsnivån i magasinet. Grundvattenmagasinets normala nivåvariation över året är ca 1 meter och i extremfall ca 2 m. Dessa nivåer uppnås inom några dygn efter nederbördsstart av ett regn, med den intensitet som var under november 1977.

Fig 24 visar grundvattennivåns variation under 1978 och 1979 för observationsröret Rb 7810, som är beläget centralt i övre delen av skredområdet. Obs-röret kan sägas vara representativt för skredområdet i stort. Nettonederbörden för motsvarande period är också inlagd i figuren. En jämförelse visar tydligt magasinets snabba reaktion på nederbörd. Avsaknad av minimumvärde under juni-juli 1978 kan delvis förklaras av arbeten med sprängstensschakten under denna period, varvid schakten hölls vattenfyllda. Bottennoteringen vid årsskiftet fram till februari 1979 beror på sträng kyla samt nederbörd i form av snö och därav ringa nybildning. Mars månads temperatur var till största delen över noll, vilket möjliggör nybildning i ej tjälade partier. Magasinet reagerar direkt på töväder under mars månad. Det erhållna resultatet från modellstudien verifieras även av denna jämförelse.

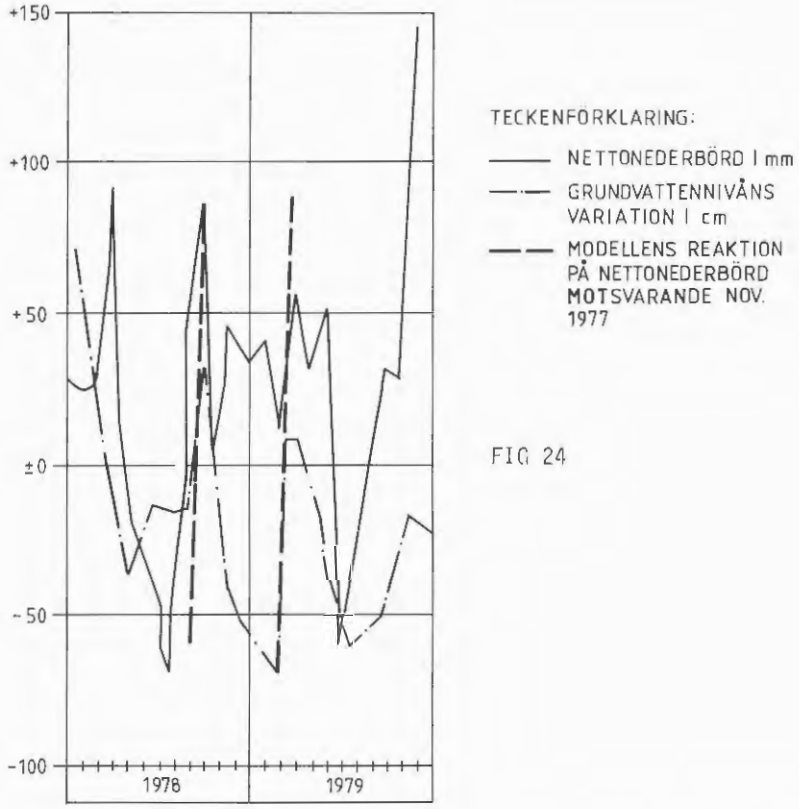


FIG 24

I fig 24 har även stigningen vid Rb 7810, erhållen från modellstudien, inlagts. Grundvattenytans stigningshastighet överensstämmer relativt väl med två tillfällen, september 1978 och mars 1979.

Anpassning till förhållandena före skredet

Den modell som redovisas över de relativa grundvattennivåerna inom skredområdet måste med hänsyn till osäkra ingångsdata med nödvändighet betraktas som mycket schematisk. Ett försök har emellertid gjorts att låsa modellen med hjälp av kända förhållanden och rimliga antaganden om grundvattensituationen före skredet. Följande observationer om grundvatten finns från området från tidpunkten före skredet.

Området nedanför den sydöstra branten på Snarberget har varit ett utflödesområde för grundvatten. Ett mindre källflöde förekommer i området och lär enligt muntlig uppgift även ha funnits tidigare än november 1977. På topografiska och geologiska grunder kan den reglerande nivån antas utgöra ungefär 25 m enligt Göteborgs höjdsystem.

Grundvattennivåerna söder om skredet, i sluttningen vid Tångenvägen mot Kvilledalen, kan två år efter skredet (vecka 49 1979) förväntas vara lika med eller nära nog lika med de ursprungliga nivåerna.

Läckage av grundvatten från det slutna magasinet i friktionsjorden under leran kan förväntas ha skett främst i de zoner, där friktionsjorden går i dagen på låga nivåer. Främst gäller detta (förutom vad ovan sagts om Snarberget) i de inre delarna av skredområdets södra kant. Den reglerande nivån kan i dessa delar bedömas variera mellan 30 och 35 m (Göteborgs höjdsystem).
Den enda egentliga grundvattenobservation som härrör från tiden före skredet finns från en punkt benämnd GK 16, väster om skredområdet, där grundvattenytan låg i eller nära markytan (+ 35 m).

Ett försök att anpassa modellen till ovanstående faktorer redovisas i figur 25. Under förutsättning att bräddningsnivån vid +25 m vid Snarberget väljs som utgångspunkt, erhålles en nära nog perfekt överensstämmelse med grundvattennivåerna från vecka 49 1979 vid Tångenvägen. Dessutom erhålles en god överensstämmelse med de bräddningsområden för grundvattenmagasinet, som på geologiska och topografiska grunder kan antas föreligga i området söder om inre skredområdet.

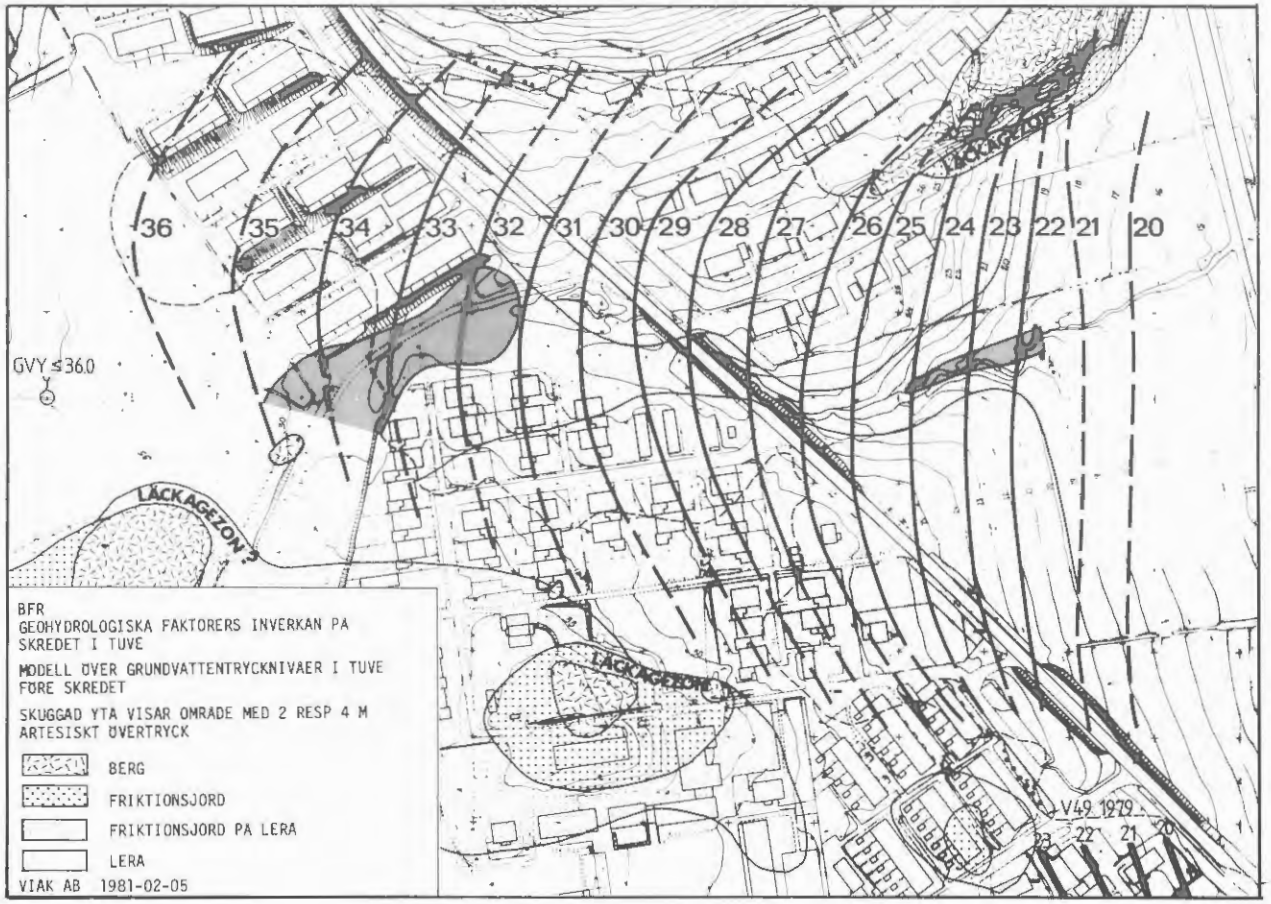

36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
GVY ≤36.0
LÄCKAGEZON?
LÄCKAGEZON
LÄCKAGEZON
V49 1979
23
22
21
20
BFR
GEOHYDROLOGISKA FAKTORERS INVERKAN PA SKREDET I TUVE
MODELL ÖVER GRUNDVATTENTRYCKNIVAER I TUVE FORE SKREDET
SKUGGAD YTA VISAR OMRADE MED 2 RESP 4 M ARTESISKT ÖVERTRYCK
BERG
FRIKTIONSJORD
FRIKTIONSJORD PA LERA
LERA
VIAK AB 1981-02-05

Fig 25

Största avvikelse vid en sådan jämförelse erhålles väster om skred-
området, där också modellens osäkerhet är som störst. Så ligger
exempelvis modellens grundvattennivåer i dessa delar.
ett par meter över den registrerade ytan vid GK 16.

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
Swedish Geotechnical Institute
S-581 01 Linköping
Tel: 013/11 51 00

Serien "Rapport" ersätter våra tidigare serier: "Proceedings (27 nr), "Särtryck och Preliminära rapporter" (60 nr) samt "Meddelanden" (10 nr).

The series "Report" supersedes the previous series: "Proceedings" (27 Nos), "Reprints and Preliminary Reports" (60 Nos) and "Meddelanden" (10 Nos).

RAPPORT/REPORT

No.		År	Pris kr (Sw.crs)
1.	Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning. *P. Ahlberg, T. Lundgren*	1977	50:-
2.	Påhängskrafter på långa betongpålar. *L. Bjerin*	1977	50:-
3.	Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. *K.V. Helenelund*	1977	30:-
4.	Basic behaviour of Scandinavian soft clays. *R. Larsson*	1977	40:-
5.	Snabba ödometerförsök. *R. Karlsson, L. Viberg*	1978	25:-
6.	Skredriskbedömningar med hjälp av elektromagnetisk fältstyrkemätning - provning av ny metod. *J. Inganäs*	1978	40:-
7.	Förebyggande av sättningar i ledningsgravar - en förstudie. *U. Bergdahl, R. Fogelström* *K.-G. Larsson, P. Liljekvist*	1979	40:-
8.	Grundläggningskostnadernas fördelning. *B. Carlsson*	1979	25:-
9.	Horisontalarmerade fyllningar på lös jord. *Johan Belfrage*	1981	50:-

RAPPORT/REPORT

No.		År	Pris kr (Sw.crs)
10.	Tuveskredet 1977-11-30 Inlägg om skredets orsaker.	1981	50:-
11a.	Tuveskredet geoteknik	1981	
11b.	Tuveskredet geologi	1981	50:-
11c.	Tuveskredet hydrogeologi	1981	40:-
12.	Drained behaviour of Swedish clays. *R. Larsson*	1981	50:-

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

Besöksadr.: Olaus Magnus väg 35, LINKÖPING

Postadr.: 581 01 LINKÖPING, tel 013-11 51 00