

Rapport nr.: 2005.080		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen	
Tittel: Hydrogeologisk modellering Bryggen, Bergen. Midlertidig rapport.				
Forfatter: Hans de Beer		Oppdragsgiver: Fylkeskommune Hordaland, Stiftelsen Bryggen		
Fylke: Hordaland		Kommune: Bergen		
Kartblad (M=1:250.000) BERGEN		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) Bergen, 1115 I		
Forekomstens navn og koordinater: Bryggen		Sidetall: 44	Pris: 200 kr	
Feltarbeid utført: -		Rapportdato: 18.11.2005	Prosjektnr.: 271200	Ansvarlig:
Sammendrag:				
<p>Setninger i grunnen er et alvorlig problem som truer kulturmiljøet ved Bryggen. Flere delprosjekter har blitt utført, både for å klarlegge forhold som fører til setninger i grunnen og for å identifisere effektive tekniker for å overvåke setningene. NGU utarbeider en numerisk grunnvannsmodell som beskriver de hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen, som kan benyttes til å vurdere og evaluere effekten av framtidige tiltak for å redusere setningene i dette området. Denne rapporten presenterer midlertidige resultater fra modelleringsarbeidet og forslag til videre arbeid.</p> <p>Studier av tidligere utførte grunnundersøkelser, setningsmålinger samt utarbeidelsen av grunnvannsmodellen viser at hovedårsakene til at grunnvannstanden ved Bryggen har gått ned er:</p> <ol style="list-style-type: none"> Strømning gjennom spuntveggen (lekkasje) rundt SAS hotellet. Strømningen under spuntveggen rundt SAS hotellet, gjennom oppsprukket fjell. <p>Disse to strømningskomponenter, i sammenheng med nydanning av grunnvann, avgjør størrelsen på grunnvannsenkning og viser dermed mulige løsninger for å redusere senkningsforløpet på Bryggen.</p> <p>Grunnvannsmodellen har gitt en bedre forståelse av de hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen. Utarbeidelsen av grunnmodellen har derimot også vist begrensninger og mangler i tidligere utførte undersøkelser, og vist nødvendigheten av å utføre ytterligere grunnundersøkelser i området. Det er derfor gitt anbefalinger på tilleggsundersøkelser som i prioritert rekkefølge er:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Måle vannføring i dreneringssystem rundt SAS hotellet. - Plassere flere flernivåbrønner i undersøkelsesområdet. - Plassere automatiske trykkmålere. - Øke dreneringsnivået ved SAS hotellet og registrere effekten på grunnvannsnivået i området. - Utføre tidsavhengig kalibrering av grunnvannsmodellen. - Utføre permeabilitetsmålinger. 				
Emneord:	grunnvann	modellering	setninger	
	kulturlag			

INNHold

1.	INNLEDNING	5
2.	HISTORIKK OG BAKGRUNNSINFORMASJON	5
2.1	Kildemateriale	6
2.2	Historisk utvikling	6
2.3	Nåværende situasjon	7
2.3.1	Terrengforhold	7
2.3.2	Overflatevann og dreneringsforhold	8
2.4	Resultater fra utførte undersøkelser	8
3.	HYDROGEOLOGISKE FORHOLD	9
3.1	Geologi	9
3.2	Hydrogeologi	11
3.3	Meteorologi	12
4.	HYDROGEOLOGISK MODELLERING	13
4.1	Konseptuel modell	13
4.1.1	Løsmasseakviferen	13
4.1.2	Fjellakviferen	13
4.1.3	Avrenning og infiltrasjonsforhold	14
4.2	Numerisk modell	14
4.2.1	Metodebeskrivelse	14
4.2.2	Modelloppbygging	15
4.2.3	Grensebetingelser	16
4.2.4	Kalibrering av modellen	17
4.3	Midlertidige modellresultater	20
4.3.1	Grunnvannstand	20
4.3.2	Situasjon ved SAS hotellet	21
5.	KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	22
5.1	Konklusjon	22
5.2	Anbefalinger	23

FIGURER

Figur 1.	Forskningsområde
Figur 2.	Geologiske enheter i Bergensbuene
Figur 3.	Tverrsnitt Bryggen
Figur 4.	Konseptuel modell
Figur 5.	3D oversikt hydrogeologisk modell
Figur 6.	Fordelingen av nedbør i modellen
Figur 7.	Kalibreringsresultater
Figur 8.	Modellert tidevannseffekt
Figur 9.	3D visualisering av grunnvannstand
Figur 10.	Tverrsnitt over spuntveggen ved SAS hotellet

TABELLER

Tabell 1.	Hydrogeologiske parametrene i modellen
-----------	--

VEDLEGG

- Vedlegg 1. Referanseliste
- Vedlegg 2. Nåværende situasjon
- Vedlegg 3. Vannstandsmålinger NIVA desember 2005 - mai 2005
- Vedlegg 4. Svakhetssoner i fjellgrunnen i undersøkelsesområdet
- Vedlegg 5. Antatt fjelloverflate
- Vedlegg 6. Nedbør 2002 - 2005
- Vedlegg 7. Beregnet grunnvannstand i kulturlag
- Vedlegg 8. Beregnet trykkendring på fjelloverflatenivå pga. drenering ved SAS hotellet
- Vedlegg 9. Beregnet endring grunnvannstand pga. drenering ved SAS hotellet

1. INNLEDNING

Prosjekt Bryggen er et langsiktig prosjekt for istandsetting av verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Tiltaket er finansiert over statsbudsjettet og er gjennomført av offentlige og private eiere. Hordaland fylkeskommune har prosjektledelsen.

Setninger i grunnen er et alvorlig problem som truer kulturmiljøet. Flere delprosjekter har blitt utført, både for å klarlegge forhold som fører til setninger i grunnen og for å identifisere effektive teknikker for å overvåke setningene. Nyvunnet kunnskap om grunnvannsforholdene rundt Bryggen har prioritert utarbeidelse av en hydrogeologisk modell. I denne sammenheng har NGU blitt bedt om å bistå prosjektet, både som kunnskapsressurs i ulike prosjektaktiviteter og i forbindelse med utarbeidelse av spesifikasjoner og eventuelt anbuds materiale.

I vårt prosjektforslag datert 5. juli 2005 deles NGUs delprosjekt opp i 5 faser:

1. Historikk og bakgrunnsinformasjon
2. Utarbeidelse av grunnvannsmodell
3. Pilot test
4. Tiltak
5. Overvåking

NGU har siden august 2005 arbeidet med fase 1 og fase 2 i delprosjektet. Hensikten med delprosjektet er å utarbeide en grunnvannsmodell som beskriver de hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen, som kan benyttes til å kunne vurdere og evaluere effekten av framtidige tiltak for å redusere setningene i dette området. I forbindelse med utarbeidelsen av grunnvannsmodellen er det konstatert at tilgjengelig informasjon fra tidligere undersøkelser ikke er tilstrekkelig til å avslutte modelleringsarbeidet i fase 2. Det er derfor foreslått en del tilleggsundersøkelser, som skal benyttes til å videreføre modelleringsarbeidet og vurdere tiltak for å heve grunnvannstanden ved Bryggen.

Denne rapporten presenterer midlertidige resultater fra modelleringsarbeidet og forslag til videre arbeid innenfor fase 2.

2. HISTORIKK OG BAKGRUNNSINFORMASJON

Det aktuelle undersøkelsesområdet omfatter verdenskulturminnet Bryggen samt tilliggende områder som påvirker grunnvannssituasjonen og dermed setningsforholdene under Bryggen. Undersøkelsesområdet er fremstilt i figur 1.

Som resultat av bl.a. arkeologiske undersøkelser, står Bryggen i Bergen siden 1979 på UNESCOs liste over verdens natur- og kulturarv. Verdenskulturminnet omfatter et om lag 13 daa stort område, og omfatter 61 fredede bygninger og de arkeologiske lagene i grunnen (kulturlagene). Stiftelsen Bryggen er en antikvarisk institusjon på Bryggen, som arbeider for bevaring av, og også er eier, av 35 av de fredede bygningene. Bryggen i Bergen er den norske representanten i EU-prosjektet "Safeguarding Historic Waterfront Sites".

2.1 Kildemateriale

Det har vært mange undersøkelser i området, både i forbindelse med prosjekt Bryggen og arkeologiske utgravinger. De resultatene som er rapportert danner et tilfredstillende grunnlag for å tolke de hydrogeologiske forholdene relatert til setningsproblematikken, og danner grunnlaget for utarbeidelse av den foreløpige hydrogeologiske modellen.

I forbindelse med EU prosjektet "Safeguarding Historic Waterfront Sites" (2001) har Stiftelsen Bryggen satt i verk prosjektet "Miljøovervåkningsprosjekt Bugården". Prosjektet har som overordnet målsetning å framskaffe metoder og kunnskap om bevaring av bygninger og kulturlag på Bryggen i Bergen. Prosjektet undersøker årsaker og omfang av skader på tømmerfundamenter og kulturlag, og er således å betrakte som et forsknings- og utviklingsprosjekt (FoU). I denne sammenheng og forut for dette prosjektet har bl.a. MultiConsult AS avd. Noteby utført flere geotekniske og miljøtekniske grunnundersøkelser i dette området. Rapporter framstiller resultatene fra utførte grunnundersøkelser, samt setningsmålinger på bygg og grunn samt målinger av grunnvannstand.

De arkeologiske utgravinger i perioden 1955 til 1979 resulterte i flere rapporter med opplysninger om geologi, grunnforhold, kulturlag, stratigrafi, vannproblemer osv.

Det ble brukt en rekke bilder, tegninger, notater og andre opptegnelser fra byggearbeidene av SAS-hotellet i 1979 til 1980 og arkeologiske utgravinger i forbindelse med arbeidet med grunnvannsmodellen.

Bergen kommune har utført modelleringen av overvannssystemet i undersøkelsesområdet og danner utgangspunkt for angivelse av permeable og tette flater i den foreliggende hydrogeologiske modellen.

Vedlegg 1 omfatter en referanseliste over rapporter, tegninger og ytterligere kildemateriale som er benyttet i utarbeidelsen av grunnvannsmodellen.

2.2 Historisk utvikling

Dagens bygninger på Bryggen står på tykke lag av bygningsrester og avfall (kulturlag) etter flere hundre år med menneskelig aktivitet. Arkeologiske utgravinger, de siste fra 1979-1980, under nåværende SAS hotellet, har gitt kunnskap om utbygging og utfylling i Vågen tilbake til tidlig på 1100-tallet. Til utfyllingene og bygningsfundament benyttet man steinfylte bolverk; grove tømmerkasser, jord og annet avfall. Bygningene ble fundamentert på krysslagde tømmerstokker. Etter branner eller andre skader, ble nye bygningene gjenreist på restene etter de gamle bygningene.

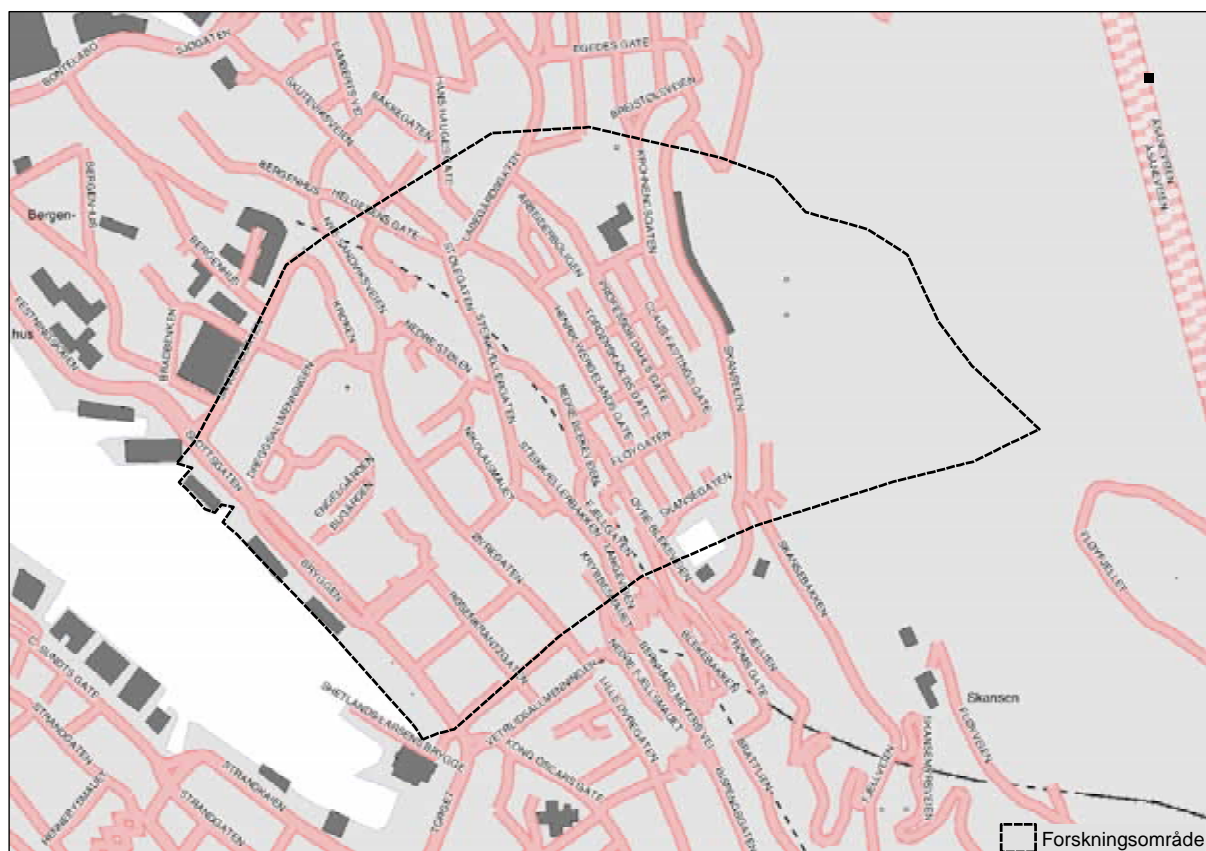
Etter brannen den 4. juli 1955 fram til 1979 har det periodevis vært store arkeologiske utgravinger på vestsiden av det nåværende kulturminnet Bryggen. De arkeologiske utgravinger ble, der hvor det var mulig, utført gjennom kulturlagene ned til det gamle sjøbunnsnivået. Utgravingene har visst at det finnes opp til 10 stadier med byggefaser og med opp til 8 meter tykke kulturlag.

Ut i fra de arkeologiske rapportene ble mesteparten av kulturlagene i byggegropa ved SAS hotellet utgravd og etterfylt på en "ukontrollert" måte med ukjente materialer. Sannsynligvis ble de utgravde materialer brukt som fyllingsmaterial.

I perioden 1979-1980 ble SAS hotellet bygd. Arbeidet involverte etableringen av en spuntvegg ned til fjellnivå rundt byggegropa, og en del sprenging av berggrunn for å anlegge parkeringshus under hotellet. Denne spuntveggen ble koblet til eksisterende spuntveggen rundt Bryggens Museum. Utgravingsnivå i byggegropa varierte mellom kote -2,65 m og kote -3,25 m under parkeringshuset, og ned til kote -5,30 m ved det nåværende fyrhuset.

2.3 Nåværende situasjon

Utstrekningen på undersøkelsesområdet er fremstilt i figur 1 og er begrenset ved Vågen mot sørvest og Sandbrogata mot nordvestsida, Finnegårdsgaten mot sørøst og opp til Fløyfjellet nordøst fra Bryggen. Avgrensingen av området har blitt gjort ut fra resultater fra utførte undersøkelser samt regionale hydrologiske og hydrogeologisk forhold som er forventet å påvirke grunnvannsforholdene under verdenskulturminnet.



Figur 1. Avgrensing av undersøkelsesområdet

2.3.1 Terrengforhold

Det er ut fra utførte undersøkelser, digitalt kartmateriale fra Bergen kommune og høydedata, som er tilgjengelig ved NGU, utarbeidet en digitalt høydemodell for forskningsområdet.

Ved fasaden ut mot Vågen varierer terrenget fra cirka kote +2,0 m på sørvestsiden av forskningsområdet til kote +1,6 m ved restaurerte bygninger foran SAS hotellet, kote +1,2 m ved Bugården, kote +0,90 m foran Svengården og kote +1,30 m på sørøsthjørnet ved Nikolaikirkeallmenningen. Ved Nikolaikirkeallmenningen og videre sørøst stiger terrenget til cirka kote +2,0 m. Kaia ligger på kote +1,8 m. Terrenget stiger i nordøstlige retning, om lag fra kote +3,5 m ved Bryggestredet til cirka kote +10 m ved Øvregaten og kote +40 m ved

jernbanetunnelen. Den høyeste delen av forskningsområdet ligger på cirka kote +285 m på Fløyfjellet. Alle brukte høydekoter har som referansenivå NN1954. Terrengmodellen viser at fasaden til verdenskulturminnet ligger i en fordypning i terrenget.

2.3.2 Overflatevann og dreneringsforhold

Vannnivået i Vågen varierer med flo og fjære. Middelvannstanden faller sammen med kote +0,01 m, middel høyvann ligger på kote +0,46 m og middel lavvann på kote -0,44 m. Middel spring høy- og lavvann ligger henholdsvis på kote +0,62 m og kote -0,60 m. Med årlige gjentaksintervaller ligger høy- og lavvann i Vågen henholdsvis på kote +1,10 m og kote -0,95 m.

Undersøkellesområdet er, foruten Fløyfjellet, stort sett et tettbebygd område. I de fleste tilfeller består gatematerialet av relativt åpent og permeabelt brusteinsdekke. Den utbygde delen av kaia er asfaltert. Mellom Øvregaten og de fredede bygningene finnes en del åpent parkareal.

Basert på informasjon fra kartverk fra Bergen kommune finnes det vann- og avløpsledninger foran fasaden mot Vågen. Vannledningen krysser kaia foran Bredsgården, mens overvannsledninger krysser kaia ved Dreggsallmeningen hvor de går ut i Vågen. Anleggsnivå til overvannsledninger varierer fra kote +0,14 m foran Bugården til cirka kote -1,35 m i Dreggsallmeningen. Overvannsledninger står i forbindelse med Vågen, men med et overløp (terskel) på kote +0,60 m, slik at sjøvann bare vil strømme inn i overvannssystemet når sjøvannstanden er over kote +0,60 m. Det pumpes overvannet fra overvannssystemet nesten kontinuerlig for å sikre lagringskapasitet i ledningene.

Mellom spuntveggen og veggen til SAS hotellet finnes overvannsledninger og spillevannsledninger for avløp av regn- og spillvann fra hotellet. På nordøst- og sørøstsiden av hotellet finnes det en drensledning innenfor spuntveggen. Drensledningen ligger flatt på kote +1,0 m. På nordvestsiden av hotellet finnes det også en drensledning, med anleggsnivå på kote +0,45 uten fall. Begge drensledninger er koblet til overvannssystemet, slik at vannstands nivå i ledninger varierer med flo og fjære når tidevannsbølgen kommer over anleggsnivået. Situasjonen ved SAS hotellet er fremstilt i vedlegg 2.

2.4 Resultater fra utførte undersøkelser

Det har vært utført mange undersøkelser som har vært relevant for den foreliggende hydrogeologiske modellen. Vedlegg 1 omfatter en liste over alle rapporter som er benyttet i utarbeidelsen av grunnvannsmodellen. Her summeres bare de resultatene fra rapportene som har vært viktigst i forbindelse med den hydrogeologiske modelleringen.

Som en del av oppfølgingen av EU-prosjektet "Safeguarding Historic Waterfronts Sites" har MultiConsult AS, avd. Noteby utført grunnundersøkelser og andre målinger på Bryggen i Bergen. Noteby oppsummerer resultatene på følgende måte:

Det har oppstått vesentlige setningsutviklinger i kulturlagene som følge av pålastninger på grunnen (ekstra last og/eller grunnvannssenkning) eller forråtnelse i fyllmassene, da disse massene er løst lagret og til dels har et høyt organisk innhold (humus og treverk). I tillegg setter noen av bygningene seg som følge av at deler av de tømrede fundamentene under dem råtner opp i jordlagene over grunnvannsnivået

(umettet sone). Det kan bemerkes i tillegg at økning i tykkelse av umettet sone også kan medføre økt råte og annen nedbryting på større deler av trefundamentene under bygningene.

Grovt sett kan man konkludere med at den største totale setningsutviklingen de siste hundre år har trolig skjedd i fronten av Bryggen, mens den største setningsutviklingen i dag skjer i Bugården/Bredsgården (inntil 6-8 mm/år). Målingene viser at setningshastigheten avtar mot øst, og er minst i området ved østre Bryggestredet og mot Nikolaikirkealmenningen (0-1 mm/år). Målinger og observasjoner tyder på at grunnvannstanden er høy i dette området, og at setningsskadene er moderate.

En annen viktig observasjon fra denne undersøkelsen finnes i et notat fra anleggsarbeidene i 1979/1980, der det ble påpekt at det i området Bugården/Bredsgården ble registrert sletter og knusingssoner i fjellgrunnen. Slike soner kan være vannførende og punktering/drenering av disse kan medføre senkning av grunnvannstanden. I tillegg kan sprengningene fra anleggsarbeidene ha medført åpning av eksisterende sprekker i berget under spuntveggen, noe som også vises på bilder fra anleggsarbeidene.

I forbindelse med restaureringsarbeid av fundament/bolverk i fiskebutikken i Holmedalsgården har NIVA utført et måleprosjekt i perioden desember 2004 til og med mai 2005. I forbindelse med foreliggende hydrogeologiske modellering, fikk NGU midlertidige resultater fra dette prosjektet. NIVA utførte målinger av saltvannsinntrenging på Bryggen, samt automatisk måling av vannstand i en peilebrønn i den nedlagte fiskebutikken. Målsettingene var å avdekke omfang og frekvens av saltvannspåvirking, samt å studere dynamikken i overflatenivå på grunnvannet og overvannet. Grunnvannstandsmålingene viste raske fluktuasjoner i grunnvannstanden under fiskebutikken, som var nesten synkron med endringer i vannstand i Vågen, og som indikerer god hydraulisk kommunikasjon mot Vågen. Vedlegg 3 viser vannstandsmålingene fra Vågen og grunnvannstandsmålingene fra fiskebutikken.

Nationalmuseet i Danmark har utført målinger av oksygen, grunnvannstand og temperatur i 6 miljøbrønner ved Bryggen. Resultatene er presentert i rapport "Oxygen, water table, and temperature measurements in dipwells around Bryggen in Bergen", datert 26. august 2005.

3. HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

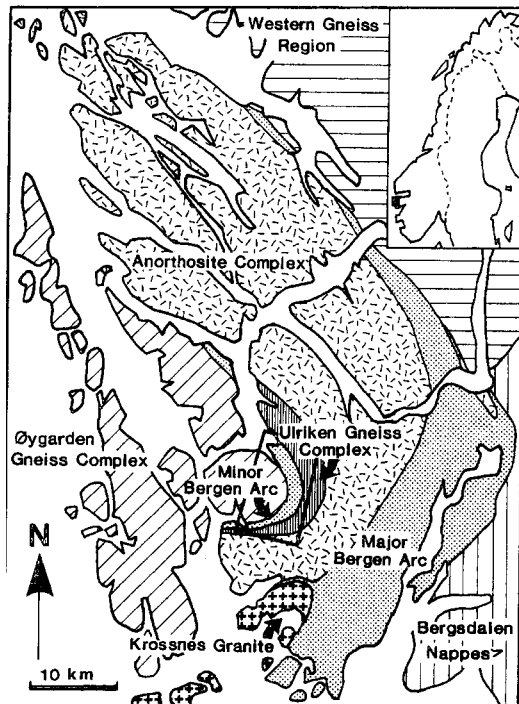
3.1 Geologi

Undersøkelsesområdet befinner seg i en geologisk formasjon benevnt "Bergensbuene". Figur 2 fremstiller en overfladisk geologisk kart av Bergensbuene.

Undersøkelsesområdet omfatter grønnstein (amfibolitt) som forekommer om lag mellom Vågen og Nedre Stølen, og fylitt (glimmerskifer) som finnes om lag mellom Nedre Stølen og Henrik Wergelandsgate. Videre nordøst finnes det diorittisk til granittisk gneis (migmatitt).

I forbindelse med anleggsvirksomheter for jernbanetunnelen nordøst fra Bryggen, ble det utført en overfladisk kartlegging av svakhetssoner, forkastninger og knusingssoner i fjellgrunnen. Denne kartleggingen viste svakhetssoner/knusingssoner i NV-SØ retning. Under

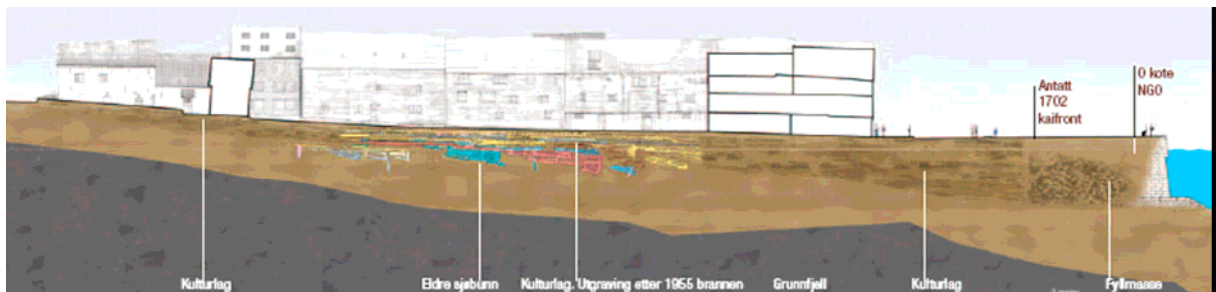
anleggsarbeidene for SAS hotellet i 1979 ble det rapportert om en del slepper i berget mot Bugården/Bredsgården. De kartlagte svakhetssoner er fremstilt i vedlegg 4.



Figur 2. Geologiske enheter i Bergensbuene

Basert på utførte boringer, sonderinger og påviste fjellblotninger er antatt fjelloverflate i undersøkelsesområdet konstruert (vedlegg 5). Sammenstilling av boredata viser at det trolig finnes en fjellrygg på østsida av undersøkelsesområdet fra Nikolaikirkeallmenningen og østover. Bergoverflaten ligger på kote -1,2 m øverst i Bugården og faller forholdsvis jevnt (om lag 1:5) mot sørvest til kote -13,7 ved sørvest veggen av SAS hotellet. Her er fjelloverflaten tilnærmet horisontal, for så å stige svakt (1:10) til kote -11,5 ved Bugårdens fasade.

Langs Vågen består fjellgrunnen av grønnstein. Over dette er det stedege løsmasser og tilført kulturlag med varierende tykkelse. Figur 3 viser et representativt tverrsnitt over løsmasser under Bryggen.



Figur 3. Tverrsnitt av undergrunnen ved Bryggen (UNESCO)

Flere undersøkelser som ble utført av Multiconsult, avd. Noteby, viser om lag følgende løsmasseforhold fra fjelloverflaten og opp til terrengnivå:

- Antatt sand, grus eller morene. Mektigheten varierer fra noen desimeter i ytterkanten av undersøkelsesområdet mot nordøst og opp mot til 4-6 m mot Vågen.

- Humusholdig sand, finsand og silt, som er antatt og være gammel sjøbunn. Mektigheten er cirka 4 meter nær Vågen og blir tynnere mot nordøst. Ut fra arkeologiske utgravinger har grensen mellom sjøbunn og fastland blitt kartlagt på nordøstsida av Bryggen og SAS hotellet.
- Kulturlag, som utgjør fyllmasser med høyt humusholdige, sand, grus, torv, treverk, brannlag, murstein osv. Kulturlaget har mektighet fra cirka 4 til 8 meter.
- Fyllmasser av stein, påvist om lag ned til dybde 1,0 m langs Bugården, helt inn til veggen langs nordre Bredsgården.

3.2 Hydrogeologi

Grunnvannstrømmen i området rundt Bryggen er stort sett topografisk styrt og som fører til at grunnvannsnivået kan sees som en avdempet fremstilling av topografien. Regional strømningsretning er derfor sørvestlig mot Vågen. Tilførsel og infiltrasjonsområdet for grunnvannet som strømmer under Bryggen er fjellområdet nordøst fra Bryggen.

Den lokale grunnvannstanden blir påvirket av forskjellige faktorer og domineres av :

- Nedbør og fordampning.
- Geologiske enheter: sand, leire, påfyllinger, berggrunn, sprekkesoner osv. og deres vannføringsegenskaper
- Sjønivå.
- Uttak eller infiltrasjon: brønner, dreneringssystemer, overvannsinfiltrasjon. Lekkasje gjennom kloakk-, overvann- og spillevannsledninger.
- Overflateforhold: bygninger, asfalt, brustein, grønne arealer osv.
- Kabel og ledningsgrøfter.
- Underjordsinstallasjoner: spuntvegg, kjeller, tunneler.

Ut fra de eksisterende målinger er det sannsynlig at grunnvann strømmer gjennom fjellgrunnen, hovedsakelig via åpne sprekker og permeable svakhetssoner/knusingssoner i fjellet fra området i nordøst, og strømmer gjennom løsmassene under Bryggen og videre ut i Vågen. I tillegg antas det at en del av nedbør infiltreres lokalt i Bryggen-området og tilstøtende områder mot nord og som også bidrar til matingen av grunnvannet i løsmassene under Bryggen. Denne antakelse er basert på geologien og områdets terrengbruk, men er ikke blitt påvist med målinger, da det mangler målepunkter i matingsområdet og under kulturlagene ved Bryggen.

MultiConsult, avd. Noteby har i de siste årene utført grunnvannstandsmålinger i området Bryggen. Generelt viser målingene at grunnvannstanden ligger høyest sentralt og i bakre deler av Bryggen (Bryggestredet), og at grunnvannspeilet faller mot fronten av Bryggen ut mot Vågen og mot spuntveggen i Bugården langs SAS hotellet. Grunnvannstanden utenfor fasaden av Bryggen viser lik variasjon med tidevannet og tilnærmet samme nivå som sjøen. De områdene med størst tykkelsen på umettet sone ligger således i området Bugården, Bredsgården, og midtre og nordre Enhjørningsgården.

Grunnvannstanden over hele Bryggen endrer seg med nedbørsintensiteten, og er ifølge Noteby ikke påvirket av tidevannet. Grunnvannsnivået er relativt stabilt, med variasjoner mellom 0,16 m til maksimal 0,72 m over ett år basert på resultater fra en måleperiode på litt over et år (april 2002 - april 2003). Endringene skjer tilnærmet samtidig i alle målepunktene, uavhengig av plassering og måledybde. Det må her bemerkes at alle observasjonsbrønner har måledyp (filterplassering) innenfor de antatt lavpermeable kulturlagene.

Høyfrekvensmålinger utført av Nationalmuseet i Danmark i miljøbrønn MB1, MB2, MB3, MB5, MB 6 og MB7 viser om lag de samme nivåendringer som Notebys målinger. Målingene viser at dynamikken (korttidsendringene) er minst ved MB1, 2, og 6 midt på Bryggen og størst ved MB5 i Bugården. Målinger av grunnvannstand i Bugården tyder på et godt drenert område med raskt respons på nedbør. Målingene i MB3 tyder på at denne brønnen er plassert feil og kan ikke brukes for tolkning av grunnvannstandene (sannsynligvis boret gjennom overvanns- eller kloakkledning).

Helningen av grunnvannspeilet mot spuntveggen langs SAS hotellet skyldes med stor sannsynlighet lekkasje gjennom spuntveggen. Grunnvannsnivået på nordvestsida av spuntveggen (innen byggegropa for SAS hotellet) holdes konstant med hjelp av et dreneringssystem. Basert på bygningstegninger fra SAS hotellet er det forventet at grunnvannstand under SAS hotellet ligger på ca. kote +0,45 m, eller noen desimeter høyere, og varierer trolig i takt med tidevannet over kote +0,60 m. Dette er per i dag ikke påvist ved hjelp av vannføringsmålinger i dreneringssystemet og grunnvannstandsmålinger i byggegropa. En feltbefaring den 10. oktober 2005 viste at drensledingen på kote +0,45 m (sørvestsida) førte vann, mens drensledingen på kote +1,0 m var tørr og dermed over grunnvannsnivået.

3.3 Meteorologi

Netto nedbør kan betraktes som:

$$P_N = P_G - f * E$$

hvor:

- P_N = netto nedbør
- P_G = Brutto nedbør
- f = fordampningsfaktor
- E = fordampning

Ut fra data fra meteorologisk institutt er gjennomsnitt årlig nedbør i Bergen ca. 2250 millimeter. Gjennomsnitt årlig fordampning ligger på cirka 450 millimeter (Penman estimerer f (temp, vind, på overflatevann)). Med en fordampningsfaktor for byområder på om lag 0,7 er netto nedbøren dermed cirka 1800 millimeter per år. Verdiene er innhentet ved Meteorologisk Institutt og gjelder Bergens meteorologisk stasjon Florida.

Vedlegg 6 viser daglige nedbørsdata for perioden 2002 til og med 2005. De fleste grunnvannstandsmålinger er også utført i denne perioden.

4. HYDROGEOLOGISK MODELLERING

4.1 Konseptuel modell

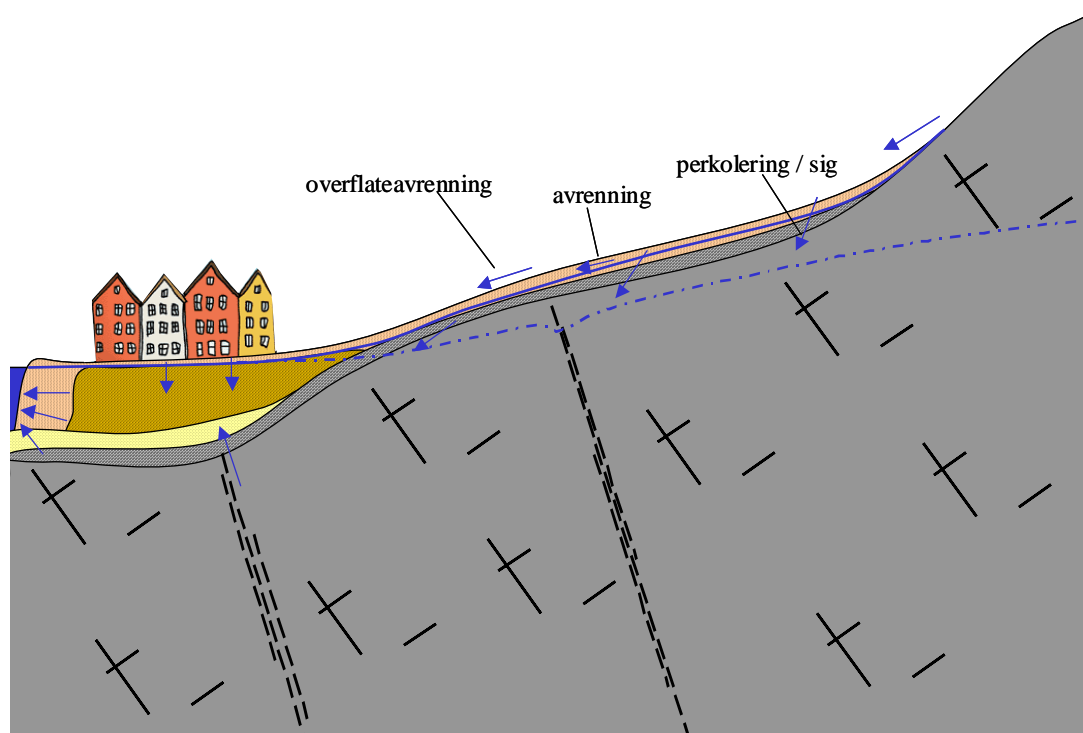
Den konseptuelle hydrogeologiske modellen er fremstilt i figur 4. Stort sett kan forskningsområdet deles opp i to akviferer med forskjellige egenskaper: en løsmasseakvifer og en oppsprukket fjellakvifer.

4.1.1 Løsmasseakviferen

Løsmasseakviferen omfatter alle sedimenter som ligger over fjelloverflaten. Akviferen består igjen av flere lag med forskjellige hydrogeologiske egenskaper og kan sees som et flerlags akvifersystem. Den totale mektigheten varierer med morfologisk posisjon, mindre på fjelltoppene/skråhellene og større mektighet ved kysten. Den totale mektigheten varierer fra cirka 15 meter under Bryggen til sannsynligvis noe desimeter på hellingene, til tilnærmet bart fjell i de bratte fjellsidene. Porøsiteten er gjennomgående høy (utenfor bunnmorenen). Vannføringsegenskapene (hydraulisk ledningsevne) er avhengig av grunnforholdene og varierer fra $1 \cdot 10^{-3}$ til $1 \cdot 10^{-6}$ m/sek.

4.1.2 Fjellakviferen

Det er ut fra de geologiske tolkninger av berggrunnen i området antatt at grunnvannsstrømmen hovedsakelig foregår langs sprekke- og knusingssoner. Det er imidlertid ikke mye kunnskap om fjellgrunnens oppsprekning i forskningsområdet. Erfaringer fra andre undersøkelser av fjellgrunnens oppsprekning viser at den kan variere betydelig, med åpninger på sprekker fra millimeter til desimeter skala, samtidig som sprekkelengden kan variere fra meter til kilometer skala. Porøsiteten i sprekker kan være lav, sannsynligvis cirka 0,1 til 0,2 prosent. Vannføringsegenskapene (hydraulisk ledningsevne) er stort sett avhengig av sprekkeåpning og er forventet i orde størrelse $1 \cdot 10^{-4}$ til $1 \cdot 10^{-6}$ m²/sek. Det er forventet at sprekkesystemene drenerer grunnvann fra løsmasseakviferen i tilførselsområdet opp mot Fløyfjellet. Løsmasseakviferen omfatter her bare en tynn lag med forvittringsmaterial og jord. Under Bryggen er det sannsynlig at sprekker mater løsmasseakviferen.



Figur 4. Konseptuell hydrogeologisk modell

4.1.3 Avrenning og infiltrasjonsforhold

Det er forventet at størstedelen av nedbøren, spesielt i byområder ikke vil infiltrere grunnen men renne av på overflaten til overvannssystemet. Noe av nedbøren vil imidlertid infiltrere og strømme via den umette sonen som avrenning langs berggrunnoverflate, kompakte sedimenter og løsmasser nedover til Vågen, avløpsystemer eller til infiltrasjonsområder (sprekkesoner). En liten del av nedbøren infiltrerer løsmassene og videre ned til fjellakviferen.

4.2 Numerisk modell

Målsetningen med å utarbeide en grunnvannsmodell er å øke forståelsen for de komplekse hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen og kvantifisere grunnvannstrømmen (vannbalanse) i dette området. Modellen skal brukes til vurdere effektive tiltak for å heve og stabilisere grunnvannstanden, og dermed oppnå en forventet reduksjon i setningshastighetene i området.

4.2.1 Metodebeskrivelse

Til modelleringen har NGU benyttet programvaren FeFlow[®] 5 .2 (WASY, 1979-2005). FeFlow[®] er basert på den endelige elementer metode for å beregne grunnvannsstrømming. Denne metoden er karakterisert ved at den konseptuelle modellen er gjengitt som et gridnett bygd opp av fleksible triangulære celler, og som benyttes i varierende tetthet gjennom modellen. Metoden er derfor spesielt egnet til variable terrengforholdene eller romlige variasjoner i egenskaper gitt av eksempelvis tunneler, spuntvegger, dreneringsledninger osv. I

modellberegningene bestemmer modellen bl.a. grunnvannshøyde og vanngjennomstrømning for hver celle.

FeFlow[®] er bl.a. egnet til å modellere dynamisk grunnvannstrømning, tetthetsstrømning, strømning i sprekkesystemer, varmestrømning og strømning i den umettede sonen.

4.2.2 Modelloppbygging

Ved oppbygging av modellen er informasjon om geologi, hydrologi og meteorologi forenklet og omsatt i en digital form som er egnet til modellering. Forenkling er helt nødvendig fordi det ikke er mulig å simulere i detalj et komplekst naturlig system. Modellen må imidlertid tilnærme seg den hydrogeologiske kompleksiteten slik at modellen kan reprodusere systemets oppførsel.

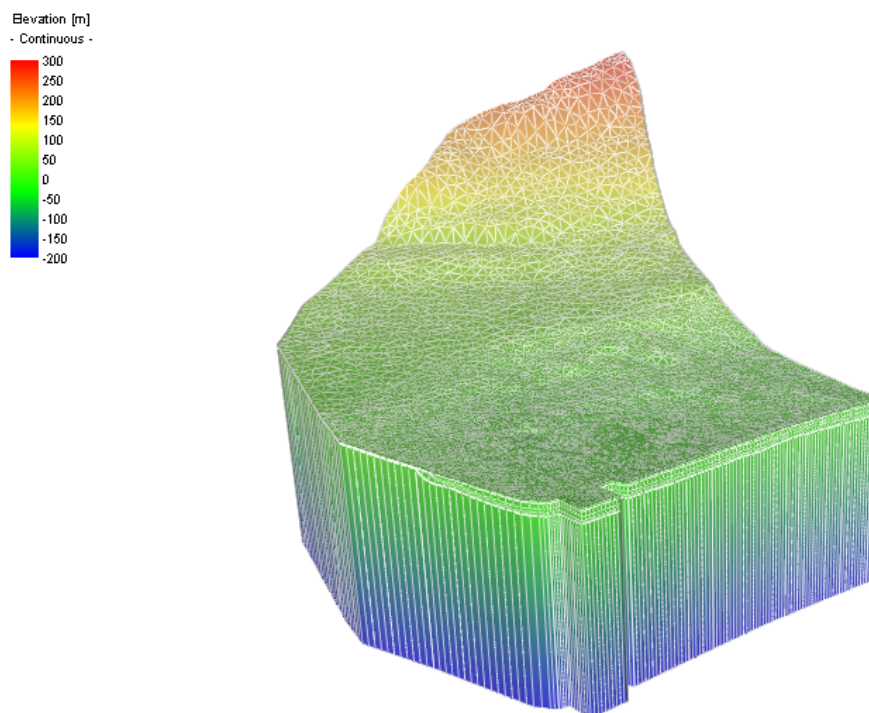
Modellen er bygd opp av 88572 triangulære celler med 6 noder og 158200 elementer som kobler noder med hverandre. Tetthet til modellnettet er på størrelsesorden 2 meter rundt problemområdet ved Bryggen og SAS-hotellet. Nord fra Bryggen blir gridnettet stadig grovere, med en tetthet opp til cirka 25 meter. Modellen er delt opp i 10 lag med ulike hydrogeologiske egenskaper, som er fremstilt i tabell 1.

Ut i fra utførte undersøkelser, digitalt kartmaterial fra Bergen Kommune og høydedata tilgjengelig ved NGU, er det med hjelp av GIS utarbeidet en digitalt høydemodell for undersøkelsesområdet. Terrengoverflate i modellen er basert på denne høydemodellen. Ved bruk av tilgjengelige boringer er det utarbeidet høydemodeller for hver lag i grunnvannsmodellen. En 3D oversikt av modellen er fremstilt i figur 5.

Tabell 1. Hydrogeologiske parametrene i modellen

Lag	Beskrivelse	Mektighet (m)	Permeabilitet (m/sek.)	
			k _H	k _V
1	Fyllmasser, SAS, spuntvegg [*]	0,01 - 1,0	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
	Fylling kai		1.10 ⁻²	1.10 ⁻²
2	Fyllmasser, SAS vegg [#] , spuntvegg [*]	0,01 - 0,5	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
	Fylling kai		1.10 ⁻²	1.10 ⁻²
3	Kulturlag, spuntvegg [*]	0,01 - 0,5	2.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁷
	Fylling kai		1.10 ⁻²	1.10 ⁻²
	Dreneringslag SAS		1.10 ⁻³	1.10 ⁻³
4	Kulturlag, spuntvegg [*]	0,01 - 8,0	2.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁷
	Fylling kai		1.10 ⁻²	1.10 ⁻²
5	Finnsand (sjøbunn), spuntvegg [*]	0,01 - 4,0	7.10 ⁻⁶	7.10 ⁻⁶
	Fylling kai		1.10 ⁻²	1.10 ⁻²
6	Sand og grus eller morene, spuntvegg [*]	0,01 - 4,0	7.10 ⁻⁶	7.10 ⁻⁶
7	Fjelloverflate (oppsprukket)	1,0	5.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁶
8	Gneis, sprekkesoner	0,01 - 400	3.10 ⁻⁸	3.10 ⁻⁸
9	Skifer, sprekkesoner	0,01 - 300	3.10 ⁻⁸	3.10 ⁻⁸
10	Grønnstein, sprekkesoner	0,01 - 200	3.10 ⁻⁸	3.10 ⁻⁸

* spuntveggen har permeabiliteten 1.10⁻⁶, #SAS veggen 1.10⁻¹⁰ og sprekkesoner 3.10⁻⁶ m/sek.



Figur 5. 3D oversikt over hydrogeologisk modell

4.2.3 Grensebetingelser

For å kunne beregne grunnvannstrømning er det nødvendig å bestemme grensebetingelsen i ytterkanten av modellen. Grensebetingelser kan være "faste" nivåer av grunnvannstand ved bl.a. overflatevann/sjøvann eller kjente grunnvannskiller, men også nedbør, kjente vannuttak eller vannstrøm over modellgrensen kan betraktes som grensebetingelser. Hvis man ikke bestemmer grensebetingelsen i modellen, betraktes grensene som "tette", dvs. ingen grunnvann strømmer inn i eller ut av modellen over disse grensene.

På sørvestsiden av modellen utgjør Vågen en "fast" grensebetingelse i modellag 1 - 3. Her er grunnvannstand like det gjennomsnittlige havnivå i Vågen. Ved ikke stasjonære beregninger er grensebetingelse tidsavhengig og vil være gitt av tidevannsvariasjon i Vågen.

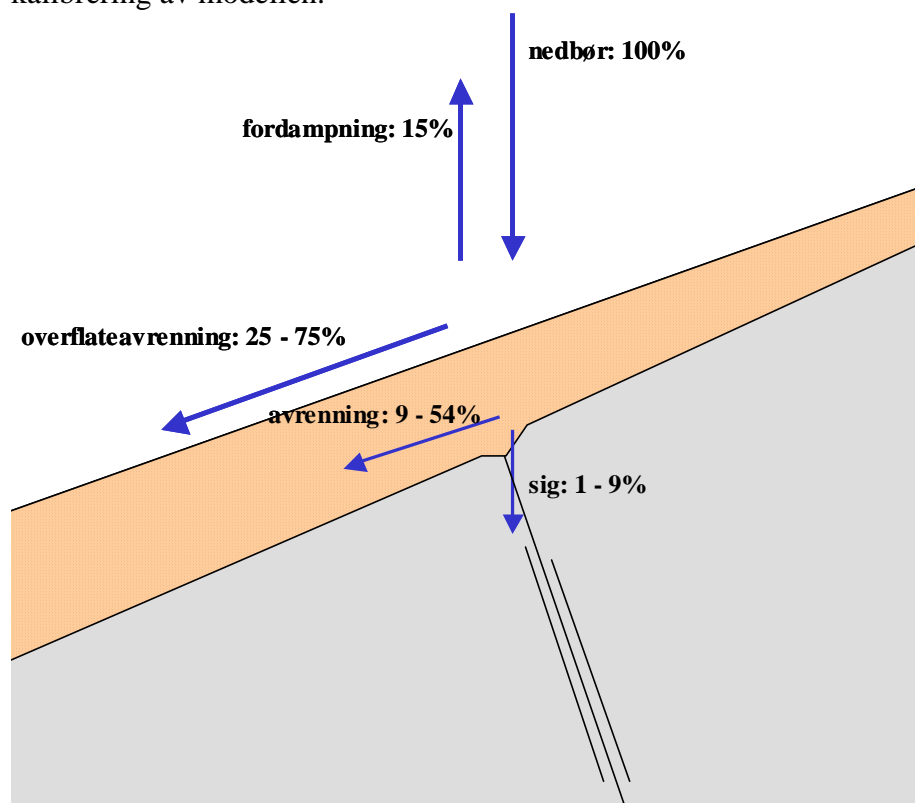
Den vestlige og østlige sider av modellen er posisjonert om lag parallelt med grunnvannsstrømmen, slik at vannstrømmen over modellgrensen kan betraktes som ubetydelig.

Ved SAS-hotellet finnes det dreneringsledning som fungerer som grensebetingelser innenfor modellen. Dreneringsledningen tar ut grunnvann henholdsvis over kote +0,45 m på nordvestsiden og over kote +1,0 m på sørøst- og nordøstsiden av hotellet. I modellen er dreneringsledninger definert som utstrømningsmulighet for grunnvann. Vannet forsvinner ut av modellen når grunnvannstanden øker over dreneringsnivået. Dreneringsledninger i modellen har altså ikke infiltrasjonsmulighet, noe som kan være tilfelle i virkeligheten. SAS hotellets

kjeller betraktes som tett og det er i modellen ikke beregnet lekkasje gjennom vegger eller gulv.

Grensebetingelsen på toppen av modellen er infiltrasjon av nedbør. For å kvantifisere den nedbørsmengden som bidrar til nydannelse av grunnvann er det brukt data og resultater fra en dynamisk modellering av avløpsystemet utført av Bergen kommune. I forbindelse med denne modelleringen er Bergens areal oppdelt i flere delfelter som bidrar til avrenning til forskjellige deler av avløpsystemet. Hvert delfelt har blitt oppdelt i bebygd areal, veier og det arealet som består av permeable flater. I modellen er det brukt en modellparameter som beskriver den effektive overflate hvor nedbør infiltreres til grunnvannsmagasinet eller rotsonemagasinet i den dynamiske modellen.

I figur 6 er det fremstilt et tverrsnitt som viser en skjematisk fordeling av nedbør i modellen. Fordelingen mellom de forskjellige strømningskomponenter har blitt gjort ved kalibrering av modellen.



Figur 6. Fordelingen av nedbør i modellen

4.2.4 Kalibrering av modellen

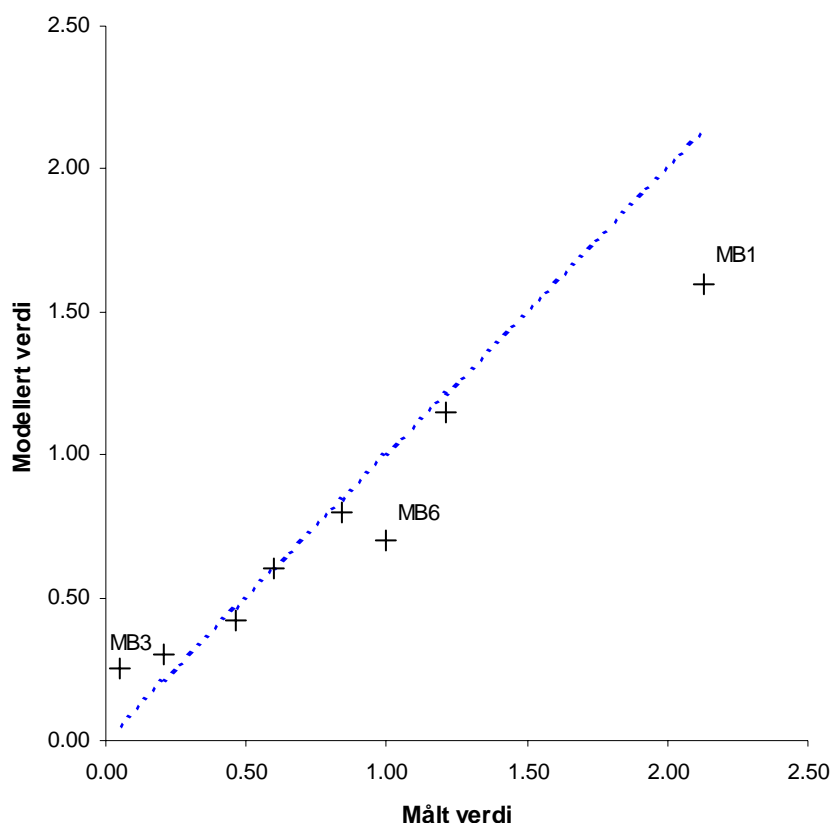
Kalibrering består av parameteroptimalisering og følsomhetsanalyser. Denne prosessen øker forståelsen for hvordan ulike parametrene som nedbør, permeabilitet, drenering, lagringskapasitet, tidevannsvariasjoner osv. påvirker de hydrogeologiske forholdene i undersøkelsesområdet. Resultatet av kalibrering er en modell som simulerer de hydrogeologiske forholdene under Bryggen på en kvantitativ måte, slik at det kan etableres en forståelse for vannbalansen i området. Ut fra denne forståelsen kan effektive tiltak for å redusere setningsforløpet vurderes.

Modellen har i første omgang blitt stasjonær kalibrert ved hjelp av et begrenset antall nivåmålinger av grunnvannet utført av MultiConsult, avd. Noteby. Stasjonær kalibrering betyr at modellen skal simulere det gjennomsnittlige grunnvannsnivået. Grensebetingelsen i den stasjonære modellen er gjennomsnittlig nedbørsmengde (1800 millimeter per år) og middelvannstand i Vågen (kote +0,01).

Utførte modellberegninger viser at permeabiliteten i berggrunn, sand/grus/morenelag og sjøbunnslagene under kulturlagene er av størst betydning for grunnvannstanden i undersøkelsesområdet. Nedbør og grunnens infiltrasjonsegenskaper har også stort effekt på grunnvannstand. Mindre variasjoner i vannføringsegenskaper til kulturlagene selv er av mindre betydning for det gjennomsnittlige grunnvannsnivå under Bryggen.

Parametrene i modellen er justert slik at det simulerte grunnvannsnivået er om lag som forventet i virkeligheten. De optimaliserte parametrene er fremstilt i tabell 1.

Figur 7 viser resultatene av stasjonære kalibrering med 8 gjennomsnittsverdier av målte grunnvannstander i miljøbrønnene MB1, MB2, MB3, MB5, MB6, MB9, PZII og PZIII. Som det framgår av sammenstillingen av målte og simulerte grunnvannsnivåer er det avvik som er delvis akseptable (avvik mindre enn 10 cm) og delvis for stort.



Figur 7. Kalibreringsresultater

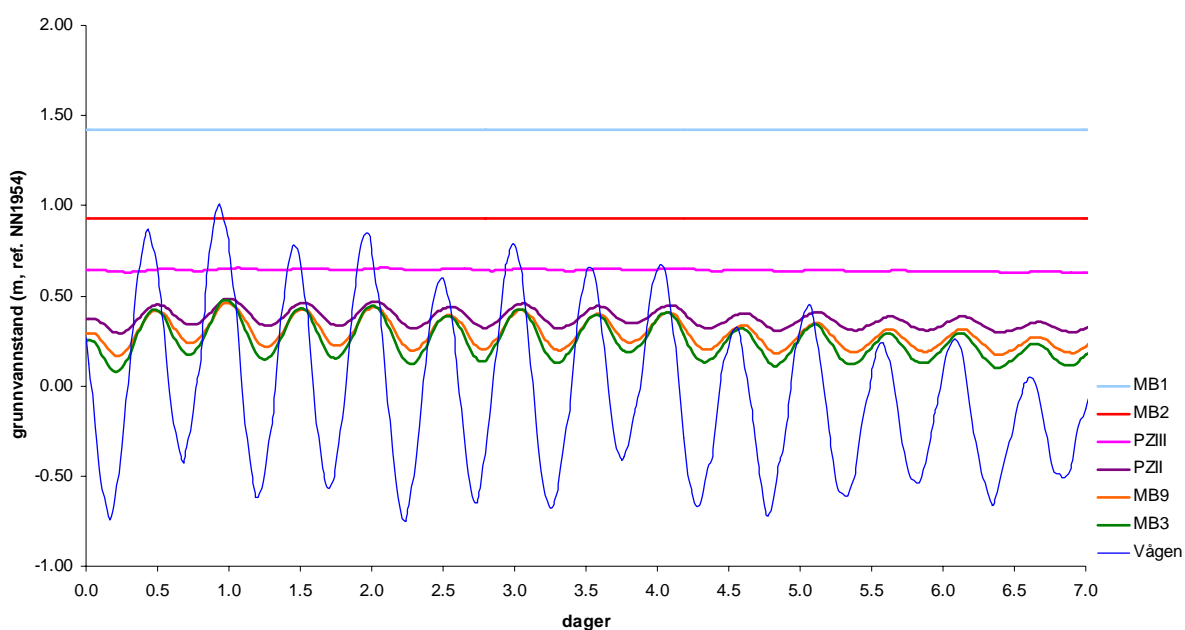
Største avvik mellom modellresultater og måleverdier er registrert i målebrønn MB1 (Bryggestredet, 45 cm) og MB3 (fasaden ved Bugården, 20 cm). Dette skyldes trolig lokale forhold som modellen ikke fanger opp. Det finnes for eksempel hydrauliske forbindelser gjennom avløpsledninger mellom Vågen og fasaden av Bryggen. Hvis disse ledningene lekker medfører dette en økt drenering mot sjøen. Slike hydrauliske forbindelser er forløpig ikke tatt med i modellen.

Den relativ høye grunnvannstand målt i MB6 har trolig lokale årsaker, men som er ikke kjent per i dag. Ved MB1 er målt grunnvannstand også relativ høyt, noe som trolig skyldes økt infiltrasjonskapasitet ved Bryggestredet (det er relativt åpent terreng her) eller lav vannføringsevne i kulturlagene.

Grovt sett simulerer modellen et noe mindre fall på grunnvannsnivået mot Vågen enn det gjennomsnittlige nivåmålinger viser. Det finnes imidlertid for få målepunktene for å kunne forklare grunnen til dette.

På grunn av mangel på lange tidsserier på nivåmålinger av grunnvannet, kan det ikke per i dag utføres en tidsavhengige kalibrering. Det ble likevel utført en tidsavhengig beregning i modellen for å teste numerisk stabilitet, følsomhet for lagringskapasitet i grunnen samt virkning av tidevannsvariasjoner på grunnvannstand under Bryggen. En modellberegning ble utført med tidevannsvariasjon i Vågen og gjennomsnittlig nedbør (konstant). Figur 8 viser modellert resultat for noen brønner.

Simulert tidevannseffekt



Figur 8 Modellert tidevannseffekt

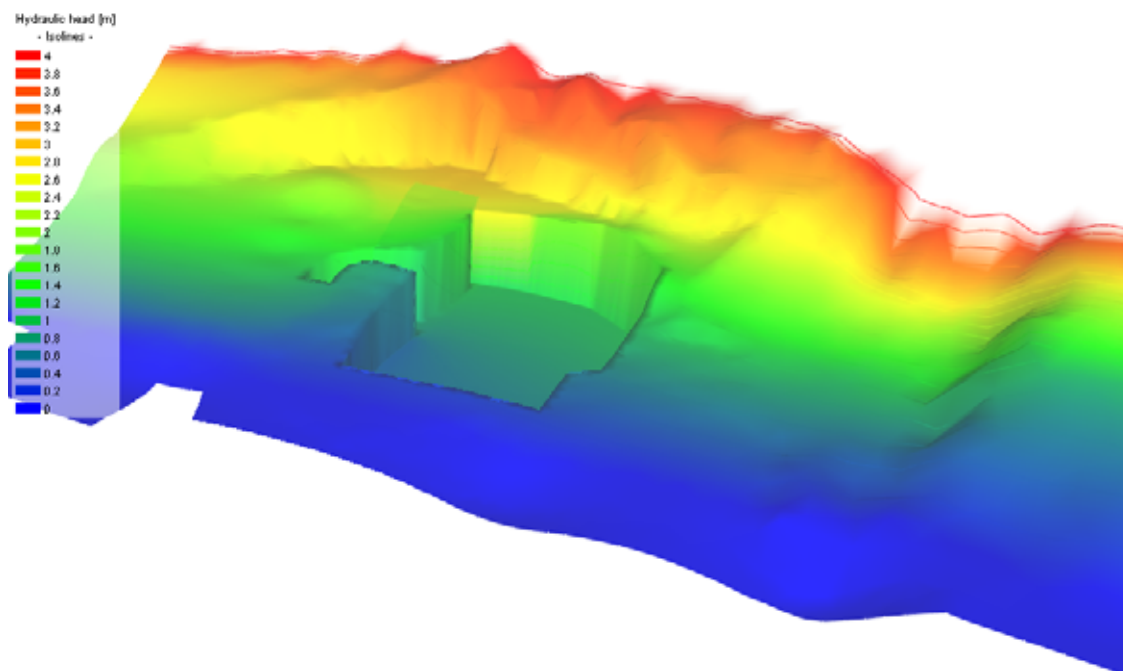
Beregningen viser at modellen simulerer noen desimeter tidevannsvariasjon ved fasaden. Variasjoner blir mindre med økt avstand fra Vågen. Nivåmålingene i M9 (Fiskebutikken) som NIVA har utført i perioden desember 2004 til og med mai 2005 viser likevel ingen klar påvirkning av tidevannsvariasjoner under kote +0,60 m. Dette skyldes sannsynligvis lav permeabilitet innen kulturlagene. Målingene som NIVA har utført er presentert i vedlegg 3. Modellen skal justeres når ytterligere høyfrekvensmålinger er blitt utført i utvalgte brønner.

4.3 Midlertidige modellresultater

4.3.1 Grunnvannstand

Vedlegg 7 fremstiller de gjennomsnittlig beregnede grunnvannsnivåene i kulturlagene i undersøkelsesområdet. Effekten fra spuntveggen og dreneringssystem rundt SAS-hotellet på grunnvannsforholdene framgår tydelig. Ut fra de parametrene som ble lagt inn i modellen viser dette at drensledningen på kote +0,45 m medfører en senkning av grunnvannsnivået på mellom 0,5 og 1,0 m under hotellet og nordlige delen av Bugården. Drensledningen som ligger på nordøst- og sørøstsiden (Bugården) av hotellet er tørr og ligger dermed over grunnvannsnivå. Dette er bekreftet ved en feltbefaring 10. oktober 2005.

Figur 9 fremstiller en 3D visualisering av grunnvannstanden ved Bryggen.



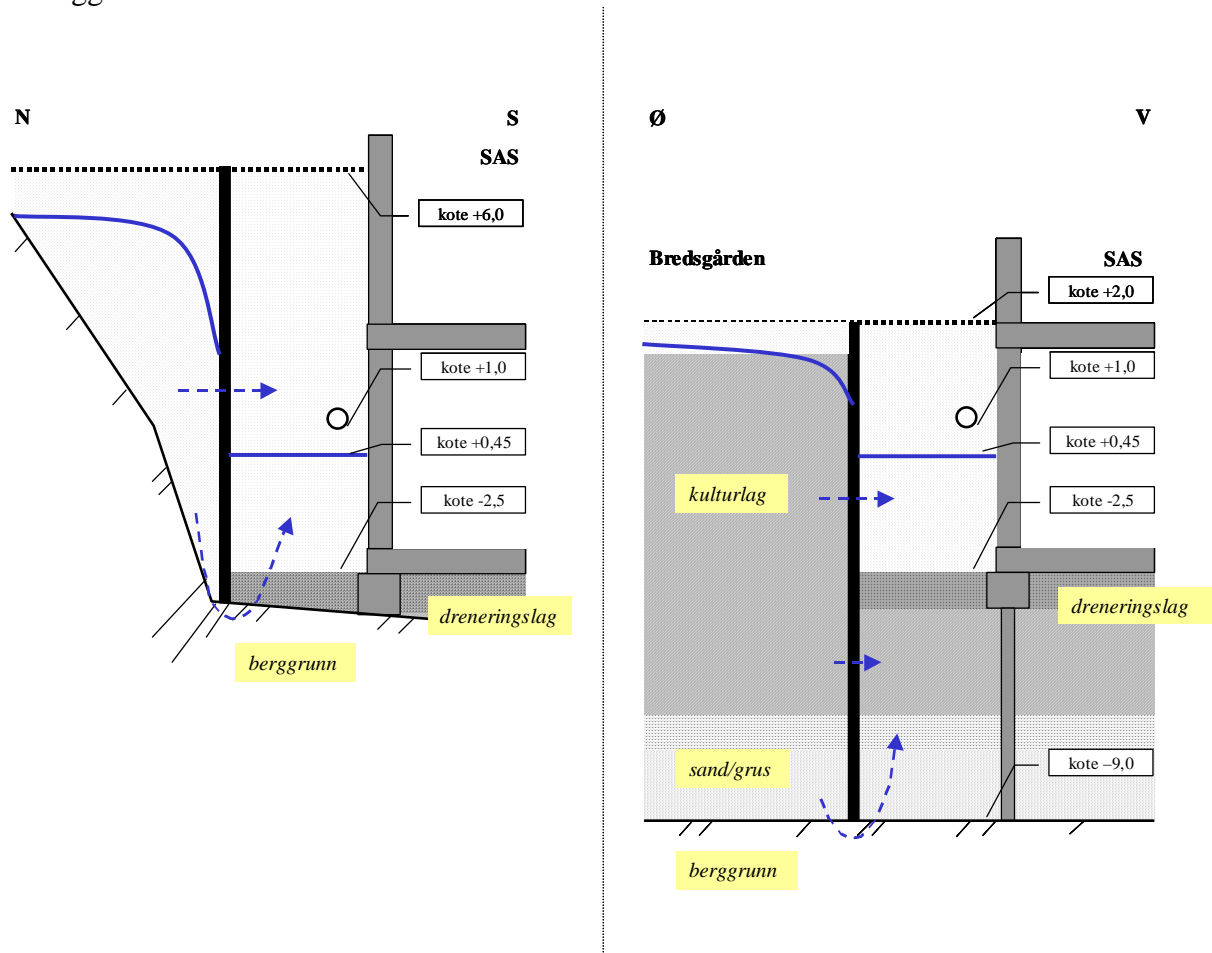
Figur 9. 3D visualisering av grunnvannstanden i modellområdet

Vannbalanseberegninger fra modellen viser at dreneringsledningen på kote +0,45 m tar ut en gjennomsnittsmengde grunnvann av cirka $19 \text{ m}^3/\text{døgn}$ ($0,22 \text{ l/sek.}$). Disse beregningene er ikke ennå verifisert med målinger.

I vedlegg 8 er beregnet effekt av dreneringsledinger på grunnvannstrykket ved fjelloverflate (dvs. under spuntveggen) fremstilt. Beregningene viser at grunnvannstrykket viser en jevnt senkning som er størst på nordsida av SAS-hotellet. Senkningsforløpet under Bryggen har en nordlig retning, med største trykkendring ved nordre Bugården. Vedlegg 9 viser senkning av grunnvannstanden og viser effekten av spuntveggen.

4.3.2 Situasjon ved SAS hotellet

MultiConsult konkluderer i sin rapport 400962 (dato 26. mars 2004) at den største senkningen i grunnvannstanden (og størst tykkelsen av umettet sone) ligger i nordre Bugården og Bredsgården. Ut i fra bygningstegninger fra SAS-hotellet og boringer som ble utført av MultiConsult er det skissert to tverrsnitt på tvers av spuntveggen (figur 10), henholdsvis på nordøstsiden (N-S) og sørøstsiden (ØV) av hotellet. Plasseringen av tverrsnitt er fremstilt i vedlegg 2.



Figur 10. Tverrsnitt over spuntveggen ved SAS hotellet

Begge tverrsnitt i figur 10 viser et grunnvannsnivå på kote +0,45 innenfor spuntveggen. Ifølge bygningstegningene finnes det 0,5 m tykt dreneringslag under parkeringshuset. Ut fra bilder tatt under bygningsarbeidet er det likevel forventet at dreneringslaget har en mektighet av cirka 1 til 2 m. På grunn av etterfølgende setninger i kulturlagene forventes det noen desimeter åpent rom mellom gulvet og dreneringslaget. På grunn av stor vannføringskapasitet i det underliggende dreneringslaget forventes det et nesten horisontalt grunnvannspeil under SAS hotellet.

Terrengnivået på nordsida av hotellet ligger noen meter høyere enn i midtre Bredsgården. Som det framgår av det nordlige tverrsnitt i figur 9 ble spuntveggen plassert på fjelloverflaten. Denne delen av fjelloverflaten har blitt sprengt ned for å oppnå en jevn byggeflate.

Spuntveggen på sørøstsida har blitt plassert gjennom den tykke lagpakken av kulturlag som finnes i dette området. Ut fra siste opplysninger fra MultiConsult har spuntveggen lokalt trolig ikke blitt plassert helt ned til fjell, gjennom underliggende sjøbunn og morenemateriale.

Hovedårsakene til at grunnvannstanden på yttersiden av spuntveggen har gått ned er:

- a) Strømning gjennom spuntveggen (lekkasje).
- b) Strømningen under spuntveggen, gjennom oppsprukket fjell.

Disse to strømningskomponenter, i sammenheng med nydanning av grunnvann, avgjør størrelsen på grunnvannsenkning og viser dermed mulige løsninger for å redusere senkningsforløpet på Bryggen.

Fordi det ikke finnes lavpermeable kulturlag rundt spuntveggen på nordøstsida av hotellet er lekkasjen gjennom spuntveggen sannsynlig mye større her enn på østsida, der løsmassene inn mot spuntveggen domineres av kulturlagene (midtre og sørlige del av Bugården).

På sørøstsiden av hotellet finnes det lavpermeabel kulturlag både på utsida og innsida av spuntveggen og grunnvannsstrømmen vil her være lav som følge av de tette massene. Dette vil gjelde både strømning gjennom spuntveggen og strømning under spuntveggen.

På nordøstsiden er fjelloverflaten sannsynligvis oppsprukket på grunn av sprengningsarbeidene som foregikk her. Bilder fra anleggsarbeidene viser tetting av fjelloverflaten med betong, men det er ukjent hvor effektiv den løsningen var. På sørøstsiden er spuntveggen plassert uten tetting gjennom kulturlag og stedege løsmasser ned til fjelloverflaten. Det er sannsynlig at det strømmer betydelige mengder grunnvann under spuntveggen, både på nordøstsiden og sørøstsiden av hotellet. Dermed blir grunnvannstrykket i kulturlagene lavere, som induserer setning. Kulturlagene har likevel en "dempende" effekt på endringer i grunnvannsnivået, slik at forandringer av grunnvannsnivået i kulturlag skjer langsomt og er trolig lavere enn trykkendringer i sand og gruslagene.

De antatt lavpermeable kulturlagene forårsaker en demping av de dynamiske trykkendringer i omgivelsene gitt av nedbør og tidevannsendringer. Som følge av dette vil eventuelle endring i grunnvannstrykket under kulturlagene gi sen respons på grunnvannstand i selve kulturlaget, og det kan ta lang tid (trolig flere år) før en ny stabil hydrogeologisk situasjon oppstår. Dette kan også forklare noe av setningsforløpet på Bryggen.

5. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

5.1 Konklusjon

Det er sannsynlig at grunnvann strømmer hovedsakelig gjennom åpne sprekker og permeable svakhetssoner/knusingssoner i fjellet fra området i nordøst, i sørlige retning gjennom løsmassene under Bryggen og videre ut i Vågen. Størstedelen av nedbøren i undersøkelsesområdet vil renne av på overflaten til overvannssystemet. Noe av nedbøren vil imidlertid infiltrere og strømme via den umettede sonen som avrenning langs fjelloverflate, lavpermeable sedimenter, avløpsystemet eller til infiltrasjonsområder (sprekkesoner) og videre ut i Vågen. Det antas at en del av nedbør infiltreres lokalt i området Bryggen samt

tilstøtende områder mot nord, og bidrar til matingen av grunnvannet i løsmassene under Bryggen. Denne antakelse er ikke blitt påvist med målinger.

Helningen på grunnvannspeilet inn mot spuntveggen langs SAS hotellet skyldes sannsynlig lekkasje gjennom eller under spuntveggen. Grunnvannstand under hotellet holdes trolig konstant på kote +0,45 m eller noe desimeter høyere, og varierer sannsynligvis i takt med tidevannet over kote +0,60 m. Dette er ikke påvist med vannføringsmålinger i drenerings-systemet eller målinger av grunnvannstanden i området. Foreløpige modellberegninger viser at dreneringsledningen rundt SAS hotellet medfører en senkning av grunnvannsnivået under hotellet og nordlige delen av Bugården på mellom 0,5 og 1,0 m.

Vannbalanseberegninger viser at dreneringsledningen på kote +0,45 m tar ut gjennomsnittlig 19 m³/døgn, mens dreneringsledningen på kote +1,0 m ligger over grunnvannstand og er derfor tørr. Disse beregningene er ikke ennå verifisert med målinger.

Hovedårsakene til at grunnvannstanden på yttersiden av spuntveggen har gått ned er:

- a) Strømning gjennom spuntveggen (lekkasje).
- b) Strømningen under spuntveggen, gjennom oppsprukket fjell.

Disse to strømningskomponenter, i sammenheng med nydanning av grunnvann, avgjør størrelsen på grunnvannsenkning og viser dermed mulige løsninger for å redusere senkningsforløpet på Bryggen.

De antatt lavpermeable kulturlagene forårsaker en demping av de dynamiske trykkendringer gitt av nedbørsvariasjoner og tidevann. Som følge av dette vil endring i grunnvannstrykket under kulturlagene gi sen respons på grunnvannstand i selve kulturlaget. Ved trykkendringer, bla. som følge av endrete dreneringsforhold, kan det trolig ta flere år før det etableres en ny stabil hydrogeologisk situasjon. Dette kan også forklare noe av setningsforløpet på Bryggen.

5.2 Anbefalinger

Som fremstilt i foreliggende rapport har grunnvannsmodellen gitt en bedre forståelse av de hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen. Utarbeidelsen av grunnmodellen har derimot også vist begrensninger og mangler i tidligere utførte undersøkelser, og vist nødvendigheten av å utføre ytterligere grunnundersøkelser i området.

Nye undersøkelser vil kunne gi en mer detaljert oversikt over de hydrogeologiske forholdene, og resultatene fra disse vil bli benyttet for videre utbygging og kalibrering av modellen. En bedre kalibrert modell vil dermed redusere usikkerheten i modellberegningene og gi bedre grunnlag til å vurdere effekten av foreslåtte tiltak og dimensjonere tekniske løsninger i fase 3 og fase 4 (ref. tilbud datert 5. juli 2005). Det anbefales å utføre tilleggsundersøkelser i prioritert rekkefølge som vi mener er:

- a) nødvendig.
- b) bør gjøres.
- c) anbefales.

Undersøkelser som er nødvendig:

Modellen ble oppbygd med flere geologiske lag med ulike hydrauliske parametrene estimert ut fra tidligere utførte undersøkelser i området. Det finnes imidlertid ingen direkte undersøkelser på stedet av for eksempel permeabiliteten i forskjellige lag i grunnen. I tillegg

finnes det ingen avrenningsmålinger fra drens-systemene i området. For å kunne forstå vannbalansen, og dermed vurdere mulige permanente tiltak, mener vi at følgende undersøkelser er nødvendig å gjennomføre:

1. Måle vannføring i dreneringssystem rundt SAS hotellet.
2. Plassere 1-2 flernivåbrønner på innsiden av spuntveggen ved SAS hotellet.
3. Plassere minst 4 flernivåbrønner med filter i kulturlaget og i underliggende sand/gruslagen.
4. Utføre permeabilitetsmålinger på stedet og i laboratorium i forskjellige lag.
5. Plassere minst 4 trykkmålere i utvalgte brønner.

Vannføringsmålingene i drens-systemet kan gi viktige opplysninger om vannlekkasje gjennom spuntveggen. Resultater vil også være viktig for kalibrering av grunnvannsmodellen. Trykkmålerne vil gi lange tidsserier av grunnvannsnivået i området, noe som er viktig i forbindelse med kalibrering av modellen og tolkning av grunnvannsforholdene.

a) Undersøkelser som bør gjøres

Den nåværende grunnvannsmodellen kan ikke kalibreres i områder utenfor Bryggen på grunn av mangel på observasjonsbrønner. I tillegg kan tidsavhengige prosesser i grunnvannsmodellen, som bl.a. påvirkning fra nedbør og tidevannsvariasjoner, ikke kalibreres på grunn av mangel på flere grunnvannsmålinger med høyere målefrekvens i de forskjellige geologiske lagene. For å redusere usikkerhet i modellresultatene bør modellen derfor kalibreres mot høyfrekvente tidsserier av grunnvannsnivåmålinger. Vi mener derfor at følgende undersøkelser bør gjøres:

1. Øke dreneringsnivået på vestsida av SAS hotellet til kote +1,0 m (og høyere hvis bygningskonstruksjonen tillater dette) og registrere effekten på grunnvannsnivået i undersøkelsesområdet
2. Plassere 2 brønner i matingsområdet utenfor selve Bryggen.
3. Plassere 2 ekstra flernivå brønner med filtre i forskjellige geologiske lag.
4. Plassere 4 ekstra trykkmålere i eksisterende brønner.

Punkt 1 er tenkt utført ved å heve overløp i kum på dreneringsledningen. Grunnvannstanden under SAS hotellet, og delvis også under Bryggen, vil som følge av dette heves.

Ut fra en feltbefaring den 10. oktober 2005, ble det konstatert at grunnvann som lekker inn i byggegropen til SAS hotellet kun renner i dreneringsledningen plassert på kote +0,45 m (nordvest sida av hotellet). Befaringen viste at dreneringsledningen på nord og nordøst sida av hotellet er tørr og ligger følgelig over grunnvannsnivået i byggegropen. Ut fra disse observasjonene anbefaler vi å heve nivået på overløpet på nordvestsiden i små steg for derigjennom å heve grunnvannstanden i byggegropen. Samtidig med dette forsøket vil grunnvannstandene både innenfor og utenfor byggegropa bli overvåkt med høy målefrekvens. Når grunnvannet begynner å renne i den andre drensledningen, skal vannføringen måles i flere kummer langs begge drensledninger. Dette "storskala" forsøket trenger gode forberedelser og overvåking av både grunnvannsforholdene og eventuelle lekkasjer i kjeller i SAS hotellet. Det er derfor nødvendig å komme i en god dialog med Radisson SAS gruppe før testen utføres.

Resultatene fra denne testen kan brukes til å vurdere permeabiliteten under SAS hotellet, og i deler av området under Bryggen. Forsøket skal simuleres ved hjelp av grunnvannsmodellen

for å vurdere grunnvannsdynamikken under Bryggen. Forsøket forventes til å gi viktig informasjon for å vurdere tiltak for en permanent heving av grunnvannsnivået i området.

b) Undersøkelser som anbefales

MultiConsult, avd. Noteby, har utført en rekke undersøkelser angående setningsforløpet ved Bryggen, noe som har gitt en god forståelse av setningsforholdene. Det ble fra 1979 og fram til i dag brukt faste målepunkter i undersøkelsesområdet. Det finnes likevel få målinger i perioden fra byggefasen til SAS hotellet (ca. 1980) og fram til siste års undersøkelser. NGU har kompetanse til å utføre analyser av setningsforløpet fra 1992 til i dag med hjelp av satellittdata med høy oppløsning og nøyaktighet på millimeterskala. En slik analyse kan gi en bedre forståelse av setningsfølsomhet til kulturlagene og gi en bedre forståelse av årsakene til setningene.

Det er fortsatt usikkerhet angående betydningen av knusingssoner/sprekkesoner i berggrunn i forskningsområdet. Vi anbefaler derfor å utføre følgende undersøkelser:

1. Analysere setningshastighet med hjelp av satellittdata
2. Utføre strukturgeologiske undersøkelser av fjellgrunnen i matingsområdet overfor Bryggen. Man skal være oppmerksom på muligheter til innsamling av strukturgeologiske og hydrogeologiske data ut i fra observasjoner fra diverse fjellanlegg i området.

Vedlegg 1

Referanseliste

REFERANSER

- Bergen kommune, Byrådsavdeling for byutvikling Vann- og avløpsetaten 2004: Retningslinjer for overvannshåndtering i Bergen kommune. *Foreløpig utkast.*
- Fossen, H. 1989: Geology of the Minor Bergen Arc, West Norway. *NGU-Bulletin 416, 1989.*
- Golmen, L.G. og Stenstøm, P. 2005: Bryggen i Bergen. Vassinntrenging i fundament og bolverk. Resultat av målinger vinteren/våren 2005. *NIVA, utkast.*
- Herteigh, A.E. 1985: The archaeological excavations at Bryggen, "The German Warf", in Bergen, 1955-68. Excavation, Stratigraphy, Chronology, Field-documentation. *Offprint from the Bryggen Papers, Main series, Vol. 1.*
- Herteigh, A.E. 1990: The Buildings at Bryggen: their topographical and chronological development. *The Bryggen Papers, Main series, Vol. 3, part 1.*
- Herteigh, A.E. 1990: The Buildings at Bryggen: their topographical and chronological development. *The Bryggen Papers, Main series, Vol. 3, part 2.*
- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 1, Verdenskulturminnet Bryggen.*
- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 2, Vurdering av kulturmiljøet.*
- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 3, Forvaltning av kulturmiljø.*
- Icomos Norway, 2000: Bergen Wharf (Bryggen). World heritage convention periodic state of conservation report 1999-2000.
- Instones, A. 2004: Status for SAS hotellets byggegrupp, Bryggen, Bergen. *Notat fra Opticonsult til Jann Atle Jensen, Multiconsult, avd. Noteby.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Spuntplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Spuntdetaljer. *Tegning M=1:10, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Oppriss av spunt ^m/grunnsnitt. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Graveplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 201-213-225. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 309-321-333, 345-357-369. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 237-249-261, 273-285-297. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 149-158-171, 182-185-196. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 101-110-113, 122-135-146. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Situasjonsplan. Profilplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Besiktigelse-plan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2004: Miljøovervåkningsprosjekt Bugården. Bryggen i Bergen. FoU-prosjekt grunnundersøkelser og setningsmålinger. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2002: Bergensprogrammet. Kollektivprioritering Bergen sentrum. Rv 585. Grunnundersøkelser omlegging av veg ved Bryggen. *Multiconsult, avd. Noteby.*

- Jensen, J.A., Stordal, A.D. og Bertelsen, G. 2000: Bryggen i Bergen. Grunnforhold. Trafikkvibrasjoner. Grunnundersøkelser og vibrasjonsmålinger. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Systad, H. 2005: Øvregaten 19. Bakre bygg. Grunnundersøkelser. Fundamentering av planlagt bygg. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A., Høvdning, Ø. og Stordal, A.D. 2003: Prosjekt Bryggen - Bygning IVe Svengården. Restaurering av verdenskulturminnet. Grunnundersøkelser. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Åsvold P.A. 2004: Parkeringsanlegg Sentrum Øst. Grunnlag for reguleringsplan. Ingeniørgeologiske undersøkelser. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2004: Bryggen Bergen. Vurderinger og tolkninger av setningsmålinger. *Notat fra Jann Atle Jensen, Multiconsult, avd. Noteby til Einar Mørk, Stiftelsen Bryggen.*
- Kompas AS 2003: Fjellsiden P-anlegg, terrengprofiler. *Tegning med borepunkter og fjellblotninger. Multiconsult, avd. Noteby.*
- Matthiesen, H. 2005: Oxygen, water table, and temperature measurements in dipwells around Bryggen in Bergen. *Nationalmuseet i Danmark, Department of Conservation, In situ group.*
- Maurseth, Ø. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Snitt og fasader. *Tegning. Øivind Maurseth Arkitekt.*
- Stiftelsen Bryggen, 2004: Safeguarding historic waterfront sites. Bryggen in Bergen as a case.
- Thunes, J. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Situasjonsplan. Arbeidstegning for utvendige ledninger. *Tegning M=1:200, 1:20. Johan Thunes Sivilingeniør.*
- Thunes, J. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Plan u.etasje, VVS-anlegg. *Tegning M=1:100. Johan Thunes Sivilingeniør.*
- Thunes, J. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Sanitæranlegg. Plan underetasje. Detaljer av pumpestasjoner. *Tegning M=1:200, 1:20. Johan Thunes Sivilingeniør.*

Vedlegg 2

Nåværende situasjon

Nåværende situasjon



Hydrogeologisk modellering Bryggen, Bergen

Tegnforklaring

(eksisterende borer	14.51 - 15
- - -	drensløsing kote 0.45 m	15.01 - 15.5
- - -	drensløsing kote 1.00 m	15.51 - 16
█	spuntvegg	16.01 - 16.5
—	Overvannsledning, viktig	16.51 - 17
terrenghøyde		
█	1.00 - 1.5	17.01 - 17.5
█	1.51 - 2	17.51 - 18
█	2.01 - 2.5	18.01 - 18.5
█	2.51 - 3	18.51 - 19
█	3.01 - 3.5	19.01 - 19.5
█	3.51 - 4	19.51 - 20
█	4.01 - 4.5	20.01 - 20.5
█	4.51 - 5	20.51 - 21
█	5.01 - 5.5	21.01 - 21.5
█	5.51 - 6	21.51 - 22
█	6.01 - 6.5	22.01 - 22.5
█	6.51 - 7	22.51 - 23
█	7.01 - 7.5	23.01 - 23.5
█	7.51 - 8	23.51 - 24
█	8.01 - 8.5	24.01 - 24.5
█	8.51 - 9	24.51 - 25
█	9.01 - 9.5	25.01 - 25.5
█	9.51 - 10	25.51 - 26
█	10.01 - 10.5	26.01 - 26.5
█	10.51 - 11	26.51 - 27
█	11.01 - 11.5	27.01 - 27.5
█	11.51 - 12	27.51 - 28
█	12.01 - 12.5	28.01 - 28.5
█	12.51 - 13	28.51 - 29
█	13.01 - 13.5	29.01 - 29.5
█	13.51 - 14	29.51 - 30
█	14.01 - 14.5	>30

0 5 10 20 30 40
meter

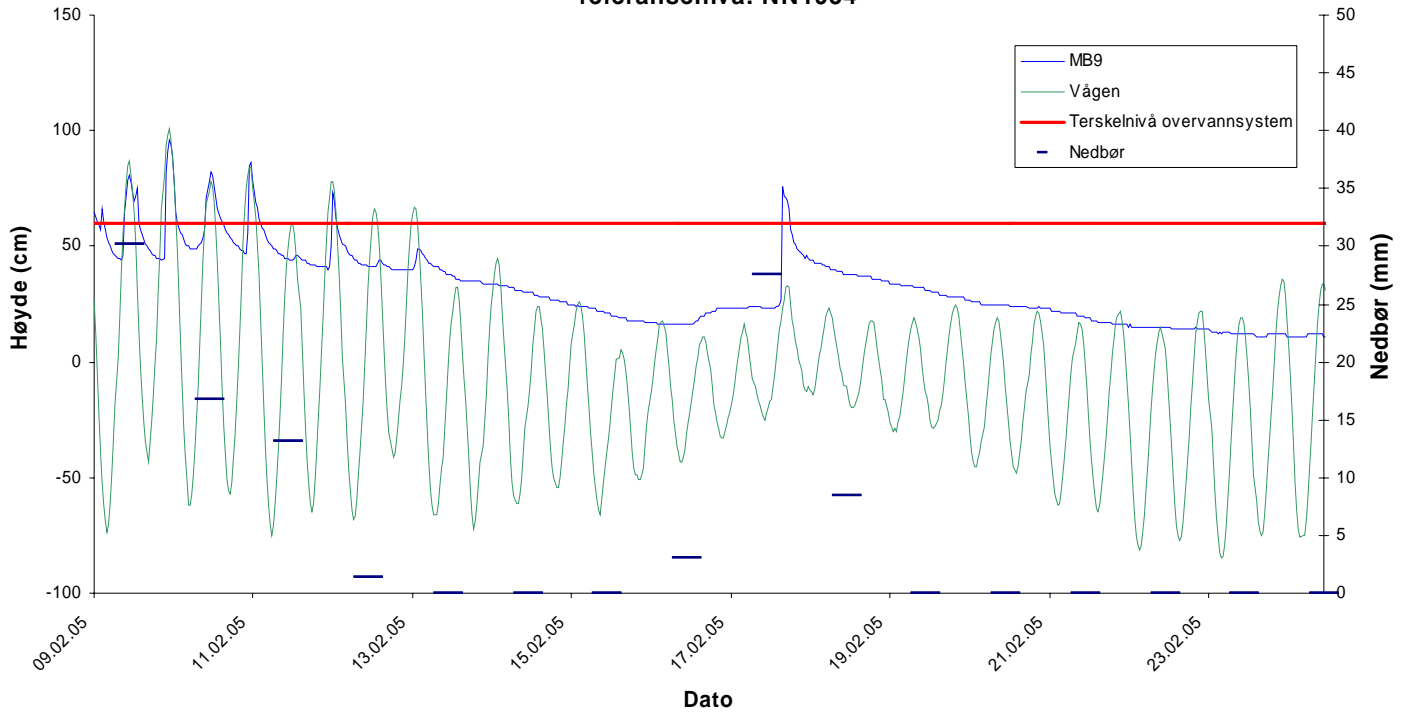
1:1 500



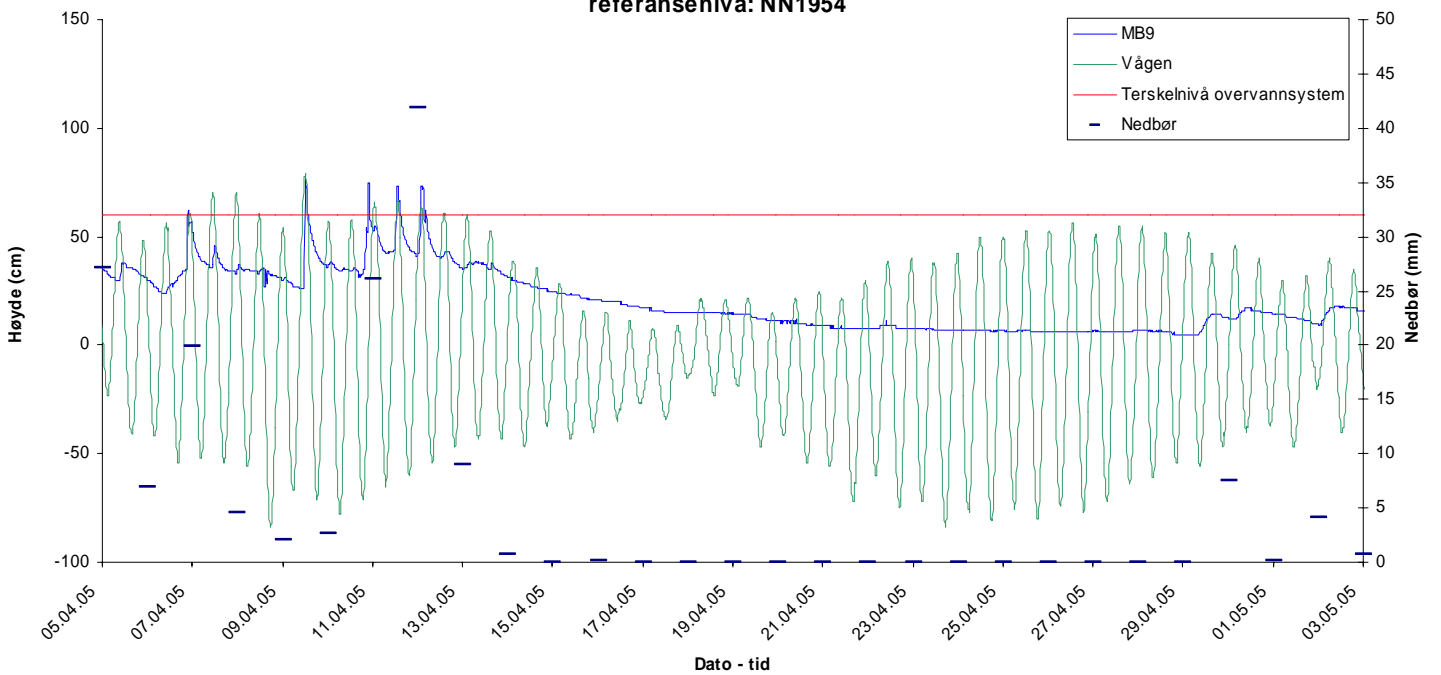
Vedlegg 3

Vannstandsmålinger NIVA
februar 2005 - mai 2005

Vannstand MB9 og Vågen referansenivå: NN1954



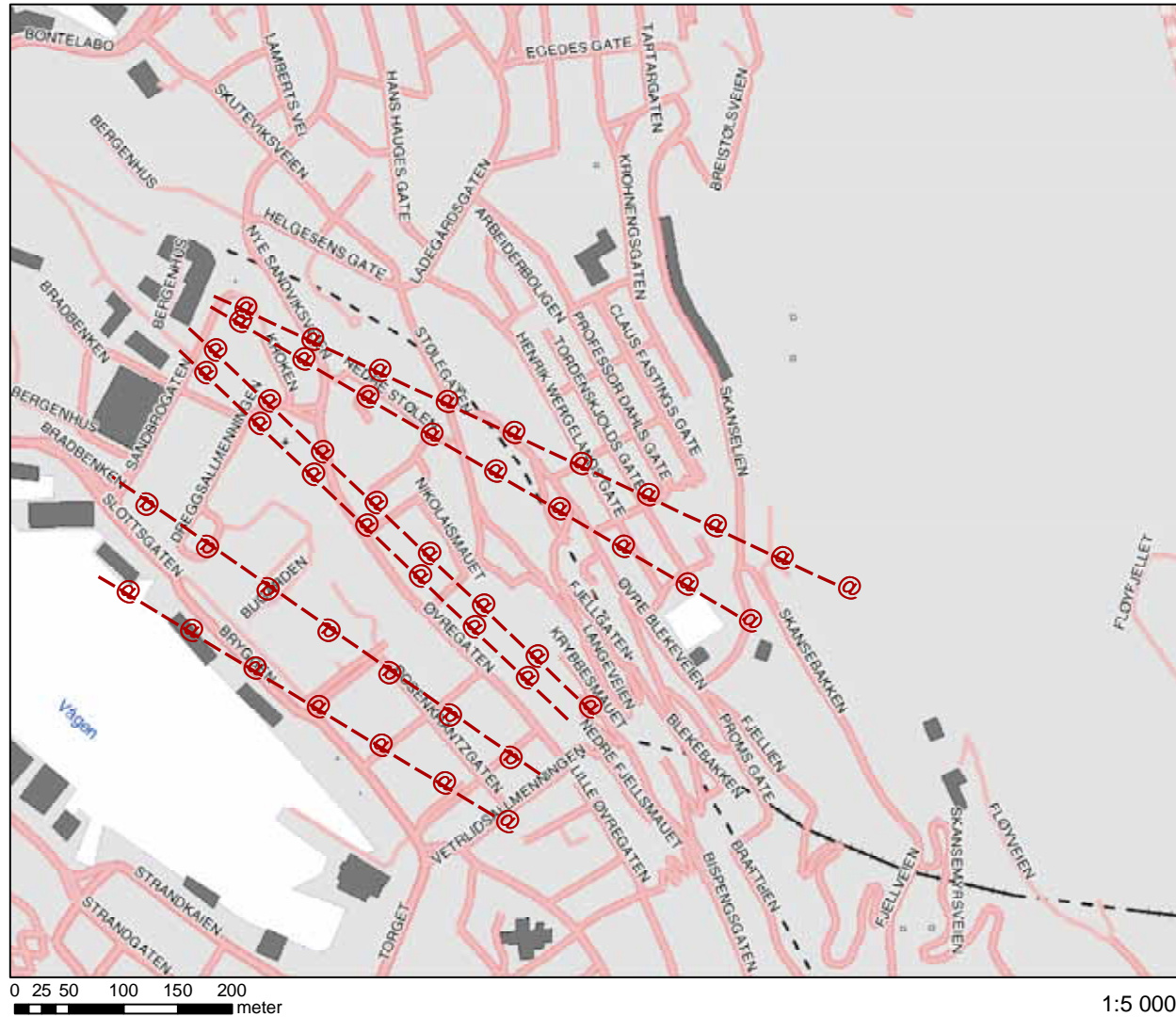
Vannstand MB9 og Vågen referansenivå: NN1954



Vedlegg 4

Svakhetssoner i fjell

Geologiske svakhetssoner i området



Hydrogeologisk modellering
Bryggen, Bergen

Tegnforklaring

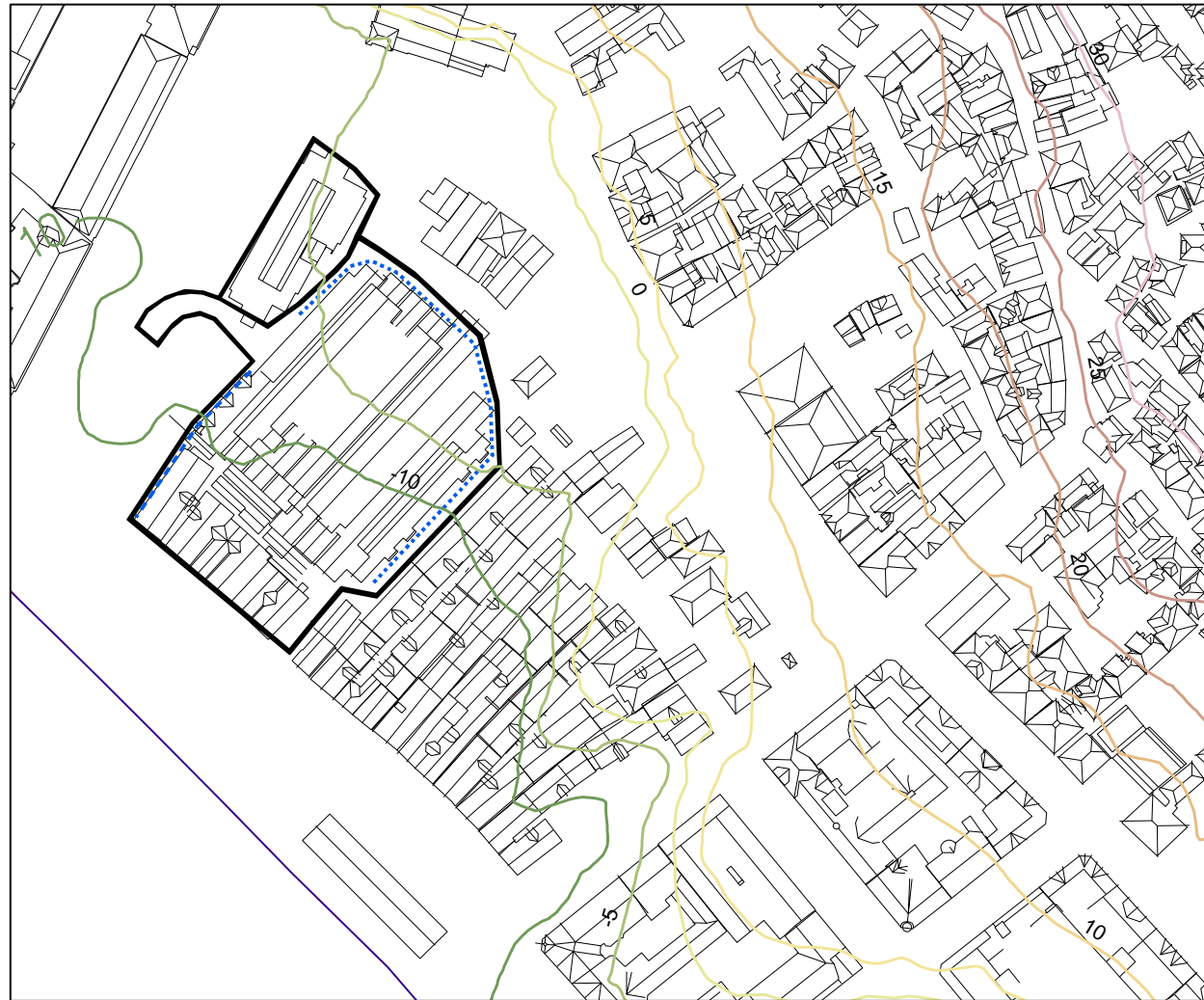
—@— svakhetszone / knusingszone



Vedlegg 5

Antatt fjelloverflate

Antatt fjelloverflate



■ Hydrogeologisk modellering
Bryggen, Bergen

Tegnforklaring

- drensløp kote 0.45 m
 - drensløp kote 1.00 m
 - spuntvegg
- fjellkoter (m)**
- 10
 - 5
 - 0
 - 5
 - 10
 - 15
 - 20
 - 25
 - 30
 - 40

0 5 10 20 30 40
meter

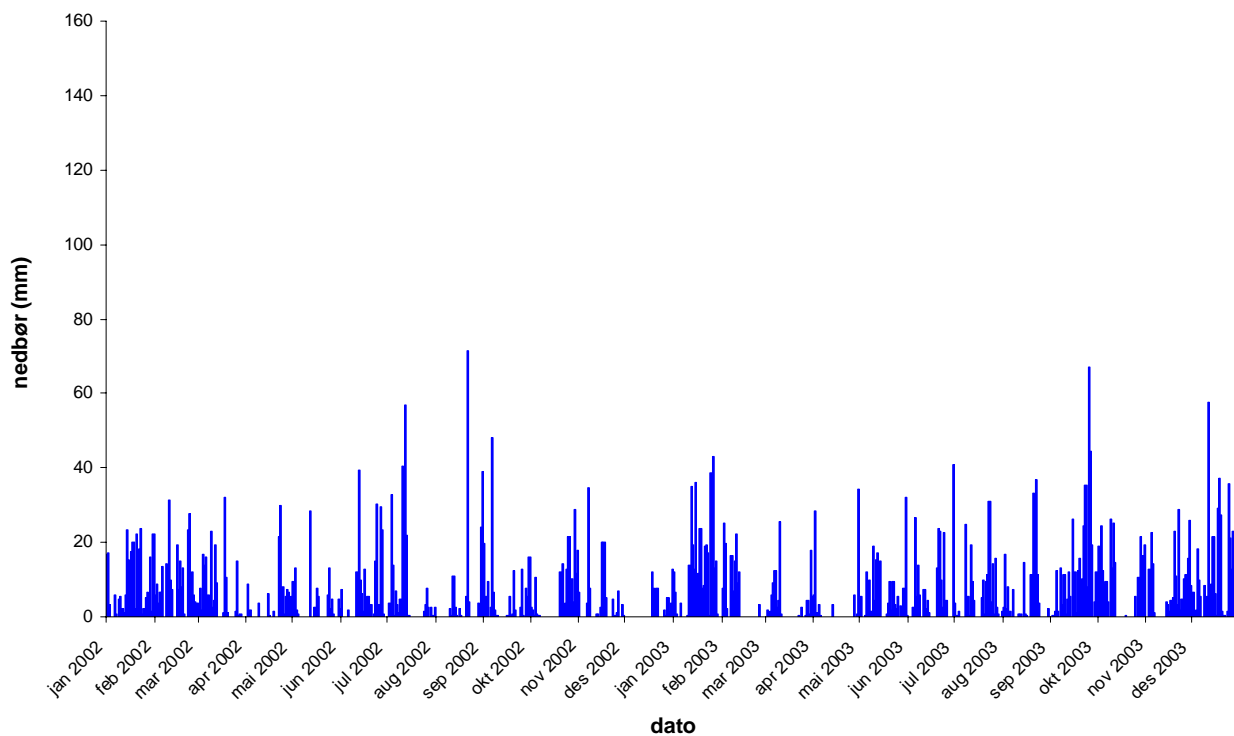
1:1 500



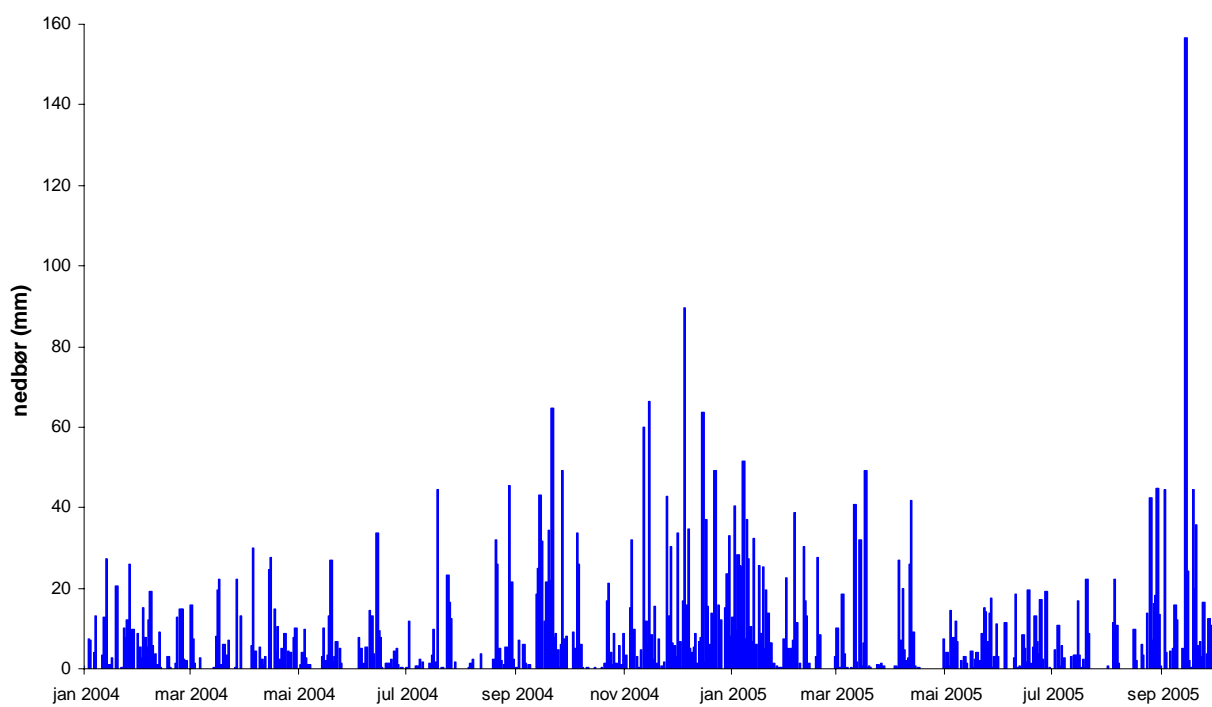
Vedlegg 6

Nedbør 2002 - 2005

Nedbør Bergen - Florida
januar 2002 - desember 2003



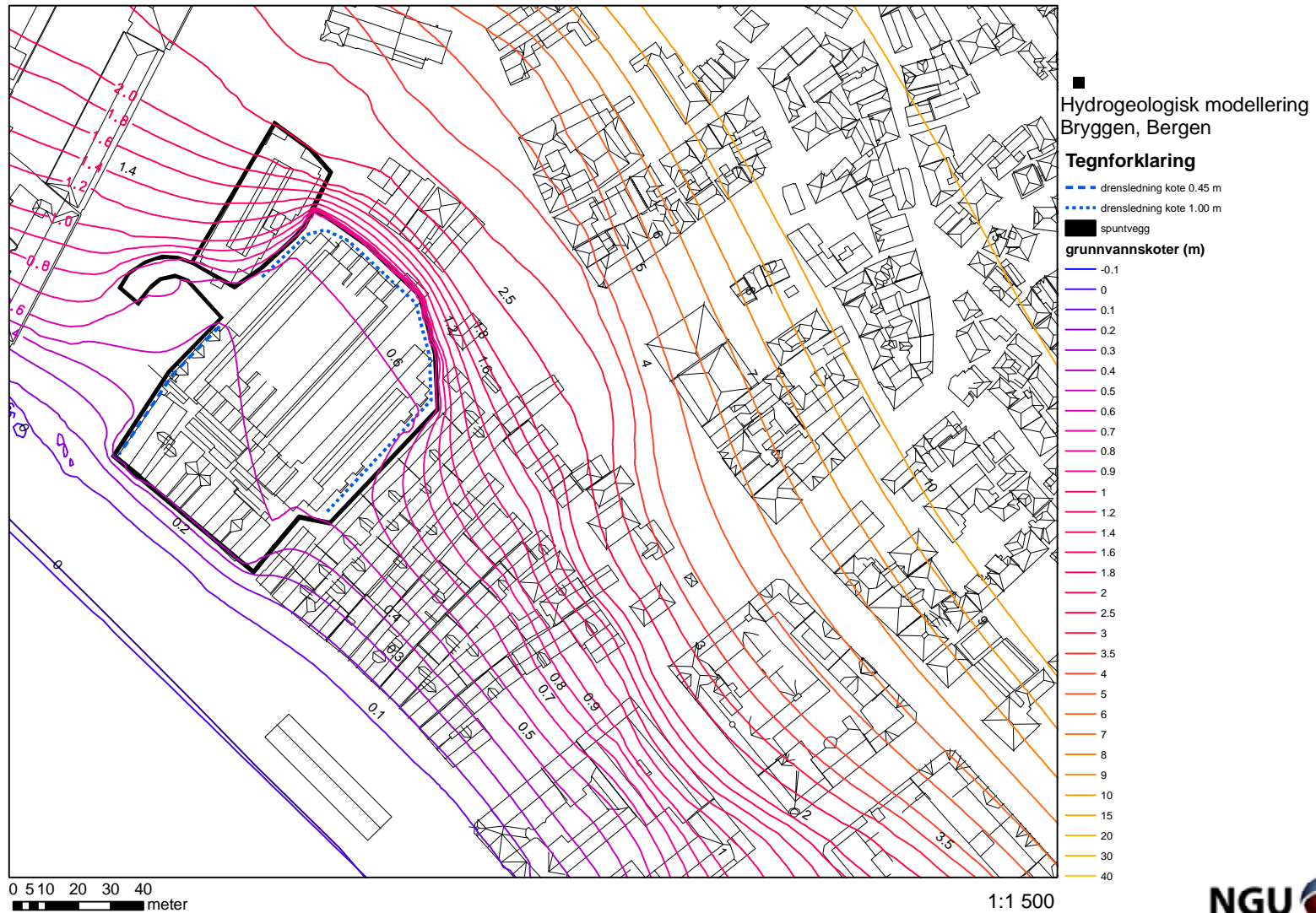
Nedbør Bergen - Florida
januar 2004 - oktober 2005



Vedlegg 7

Beregnet grunnvannstand i kulturlag

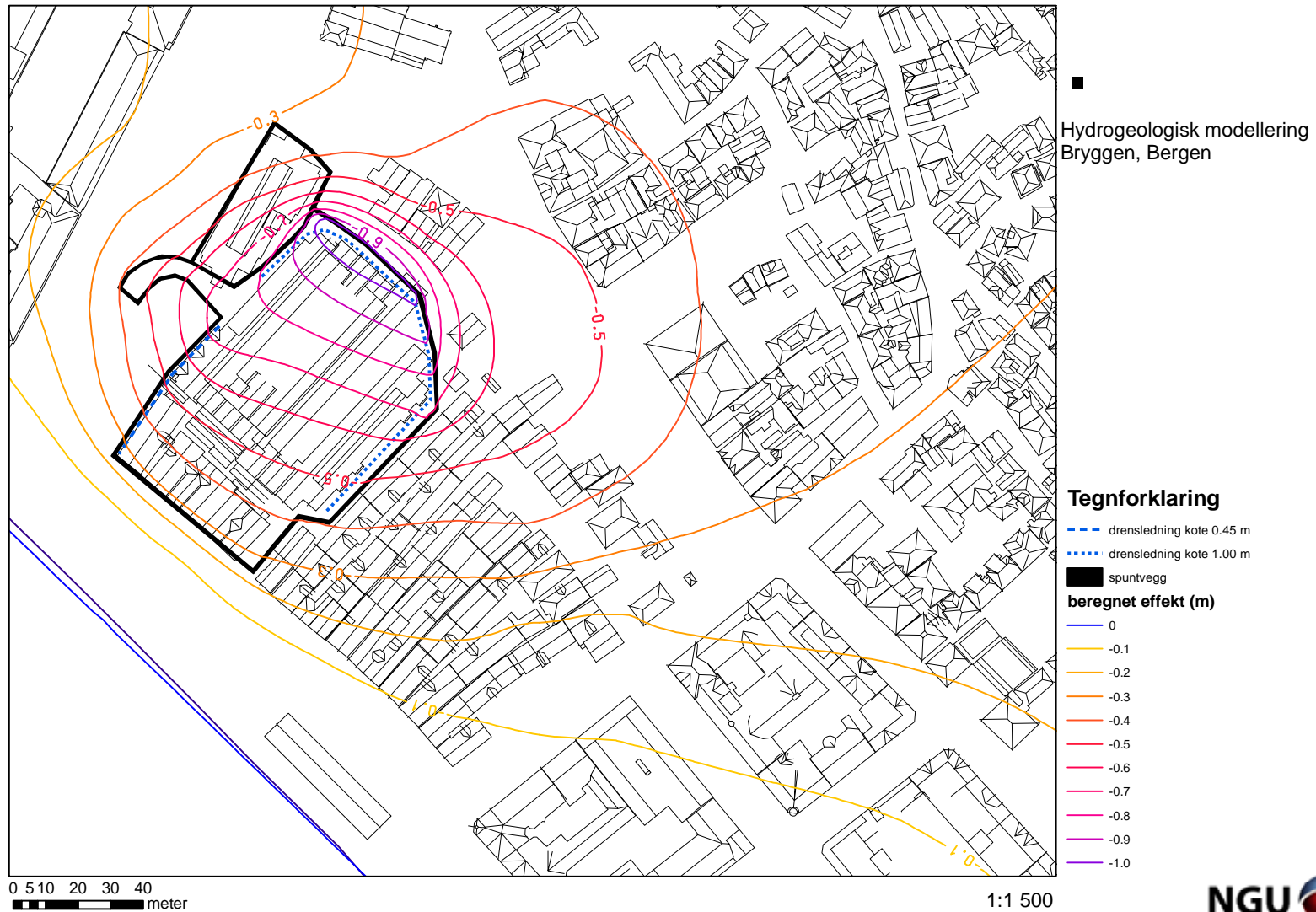
Beregnet grunnvannstand kulturlag



Vedlegg 8

Beregnet trykkendring på fjelloverflatenivå
pga. drenering ved SAS hotellet

Beregnet trykkendring på fjellnivå pga. drenering ved SAS



Vedlegg 9

Beregnet endring grunnvannstand pga.
drenering ved SAS hotellet

Beregnet endring grunnvannstand pga. drenering ved SAS

