

# 해외 심층처분부지의 지질조건 및 부지선정 사례 - 스웨덴 사례를 중심으로

민기복

서울대학교 공과대학 에너지자원공학과

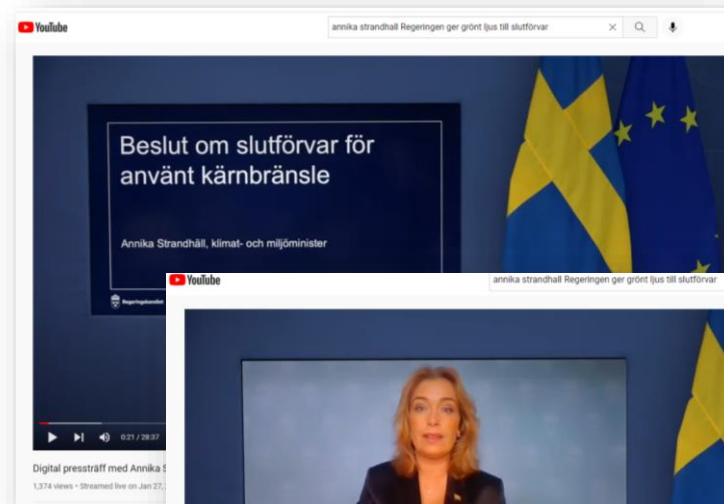


- 들어가며
  - 스웨덴의 심층처분장 건설 결정 시사점(2022년 1월)
- 심층처분 관련 이슈
  - 부지조사 진행과정
  - 부지모델 구축
  - 암석역학 부지조사 사례
  - 두 후보부지에 대한 비교
- 결언



2021년 12월8일 기자회견

- 2022년 1월27일 사용후핵연료 심층처분장 건설 발표 및 디지털 기자회견
  - 2021년 12월 8일 발표 예고 기자회견
  - Annika Strandhäll (스웨덴 기후환경 장관)
  - 심층처분장 건설허가 발표
- 스웨덴은 5,000 종 이상의 기술보고서를 공개



2022년 1월27일 건설허가 발표 (디지털)

Sweden's government has today made a completely unique and historic decision to make possible a safe final repository of Swedish nuclear fuel. We do this to take responsibility for both the environment and people. But also for Sweden's long-term electricity supply and Swedish jobs. Our generation must take responsibility for our waste, and with today's decision, together with Finland, we will become world leaders in this area. We cannot have a situation where nuclear waste lies waiting in pools year after year. The solution for final disposal that now exists has been investigated for a long time. It is carefully researched and it is well prepared. Now this work will continue by the land and environment court having to determine the conditions at the same time that the step-by-step examination as it is called can now begin with the radiation safety authority. A solution for final disposal of spent nuclear fuel through it we also ensure that we can use the existing nuclear power as part of our transition to become the world's first fossil-free welfare nation. It is also an important step to secure Swedish electricity sales in the long term, secure the Swedish economy and Swedish jobs. Now we take care of the waste and we thereby also guarantee a slightly safer future.

역사적 결정/환경을 위해/우리세대의 책임/안정적 전력/일자리/우리가 세계선도  
/오랫동안 연구/마냥 기다릴 순 없다/국토환경법원과 규제기관이 계속 규제



부지조사 반대 시위 Almunge, 1985

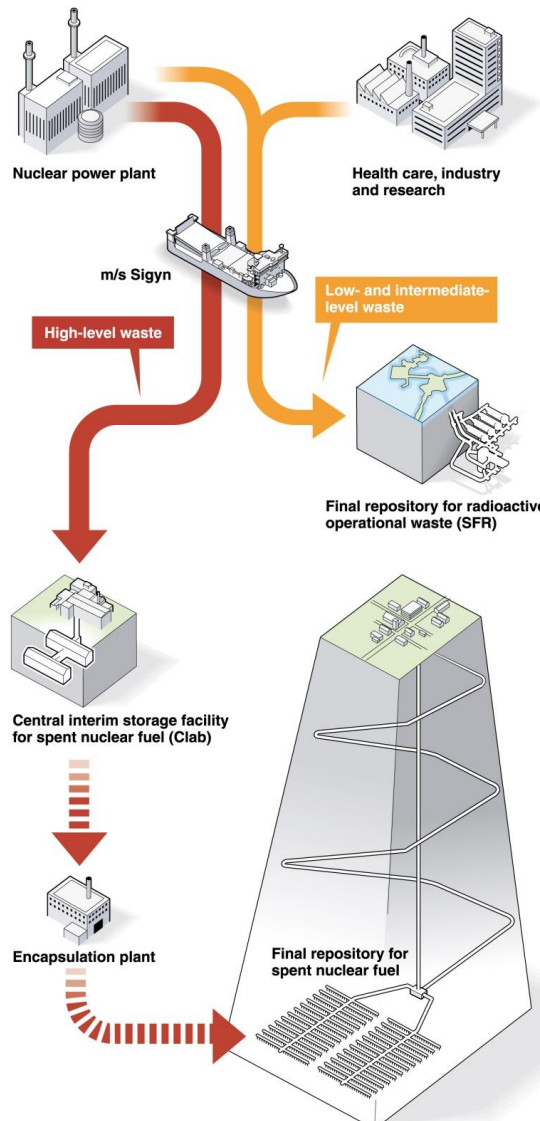


부지선정 발표, Stockholm, 2009



처분장 허가 발표, 2022

### The Swedish system



### • 현황

- 원자력발전소 총 6기 운영중 (6기 폐쇄), 전력생산의 약 35% (2020)

### • 지하처분시설:

- 지하 중저준위 처분장 및 고준위 폐기물 임시저장
- 고준위방사성폐기물 처분장 (건설허가)

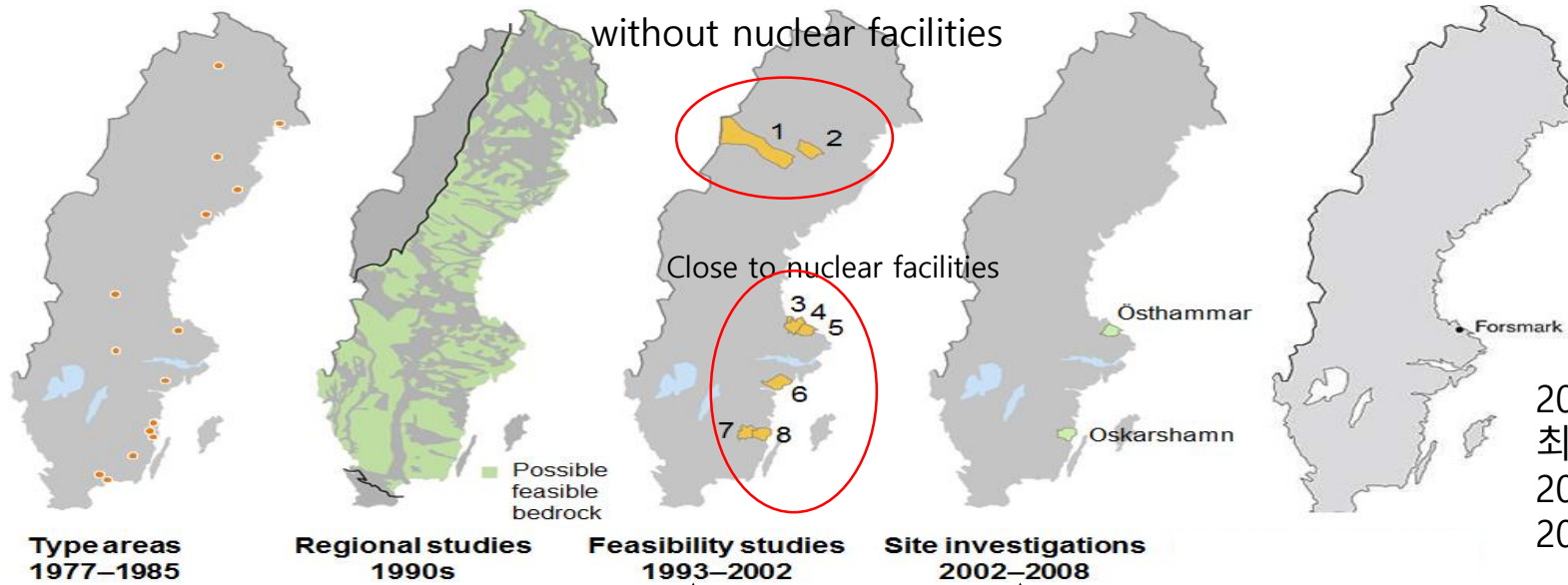
### • 지하연구시설

- Stripa Mine
- Äspö HRL (1995 - )

# 스웨덴의 부지조사 과정 최종부지 선정 및 허가까지의 과정(1977년-2022년)



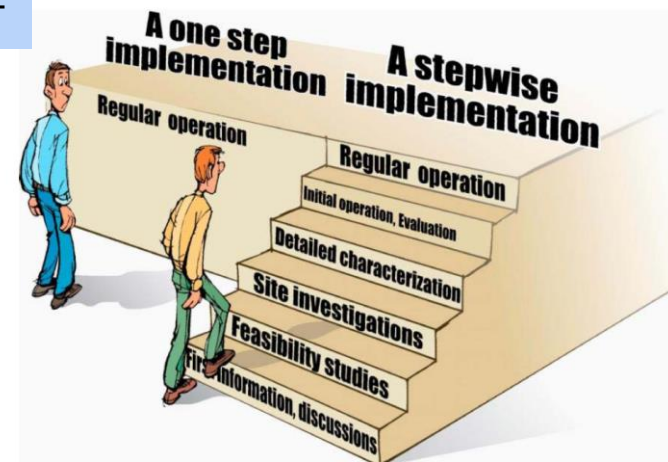
SKB INTERNATIONAL UNIVERSITY



2009: Forsmark  
최종부지 선정(SKB)  
2011: 부지면허 제출  
2022: 최종허가

타당성조사

(정밀)부지조사



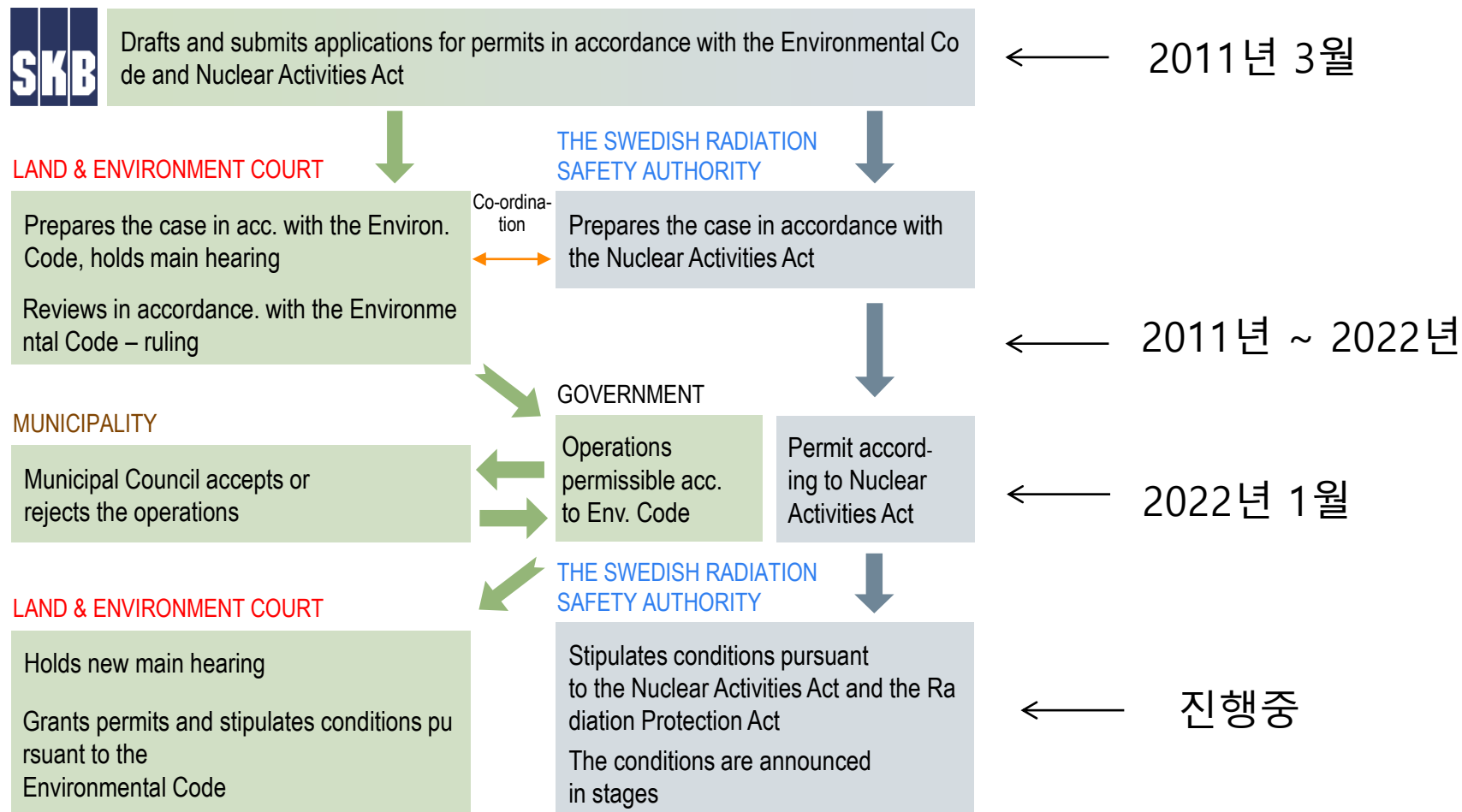


# 스웨덴의 부지조사 과정 고준위 방폐장 인허가 절차



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

국토환경법원 (Land & Environmental Court)과 스웨덴 방사선 안전청 (SSM, Swedish Radiation Safety Authority)에 의해서 인허가 심의 진행



# 스웨덴의 부지조사 과정

## 부지선정 요인



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 안전과 관련된 요인
- 사회적 자원
- 실행을 위한 기술
- 보건환경

### SKB's siting factors

#### Safety-related site characteristics

Bedrock composition and structure
Future climate
Rock mechanical conditions
Groundwater flow
Groundwater composition
Solute transport
Biosphere conditions
Site understanding

#### Societal resources

Suppliers, human resources
Public and private services
Transport and communications

#### Technology for execution

Flexibility
Technical risks
Technical development needs
Functionality, operational aspects
Synergies
Costs

#### Health and environment

Occupational safety and radiation protection
Natural environment
Cultural environment
Residential environment
Resource management

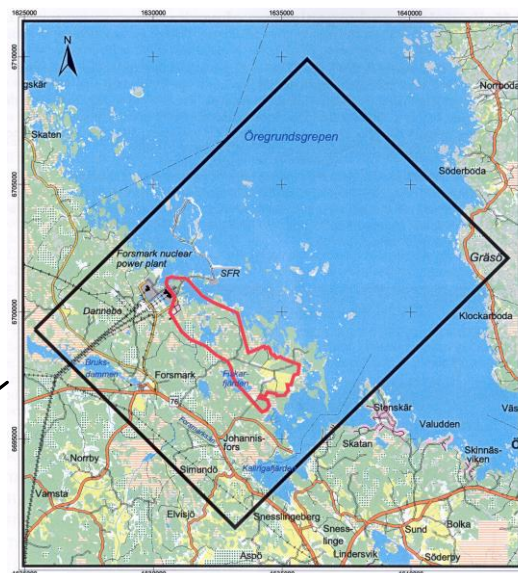


# 스웨덴의 부지조사 과정 개괄



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

Östhammar Municipality: Forsmark



Forsmark

Stockholm

Oskarshamn



Oskarshamn Municipality: Simpevarp & Laxemar



Map of Sweden

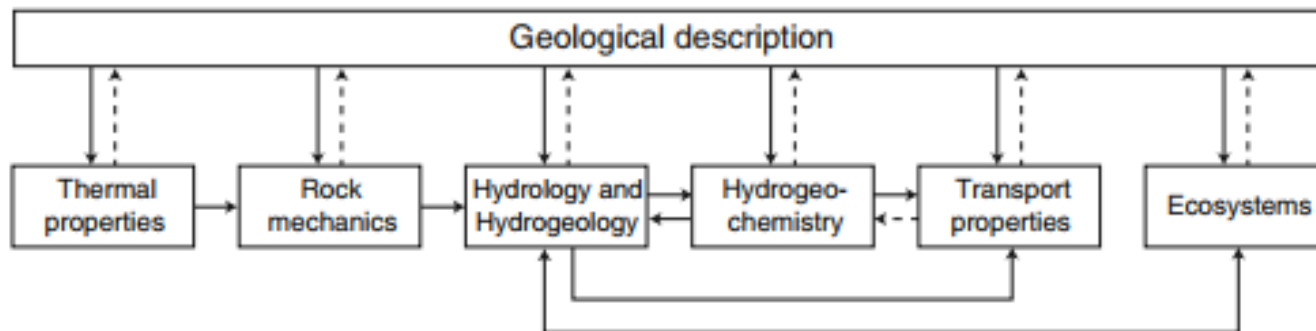
# 스웨덴의 부지조사

## 부지모사 모델 및 조사 요소



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 부지모사 모델:
  - 부지의 진화과정, 부지자료 및 공간적 분포를 통해 처분장의 장기거동 평가의 자료로 활용
  - 진화과정(고지질, Evolutionary aspect)
  - 지표시스템 (Surface system): 기후, 수리, 지표활용
- 지질(Geology): 암종, 변형대 및 균열 특성화 등
- 암석역학 모델(Rock Mechanics)
- 열적 모델(Thermal properties)
- 수리지질모델 (Hydrogeology)
- 지구화학 모델 (Geochemistry)
- 이동 모델(Transport model)



# 스웨덴의 부지조사 부지모사 모델 및 조사 요소



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY



시추현장 (2003년 6월)

코어 보관소 (2004년 10월)

## • 넓이

- 광역모델: 넓이 16.5 km<sup>2</sup>, 깊이 2.1 km (해발기준)
- 지역모델: 넓이 12 km<sup>2</sup>, 심도 1.1 km (해발기준)

## • 암석역학모델

- 단축압축강도, 인장강도, 삼축압축강도, 탄성계수, 포아송비
- 균열 수직강성, 균열 전단강성, 균열 팽창각, 균열마찰각, 균열전단강도
- 초기응력: 오버코링, 수압파쇄, 간접측정(공벽파괴, 코어디스킹), 수치해석
- 암반 모델의 다른 암반물성 산정: 수치해석, 암반분류 등 적용

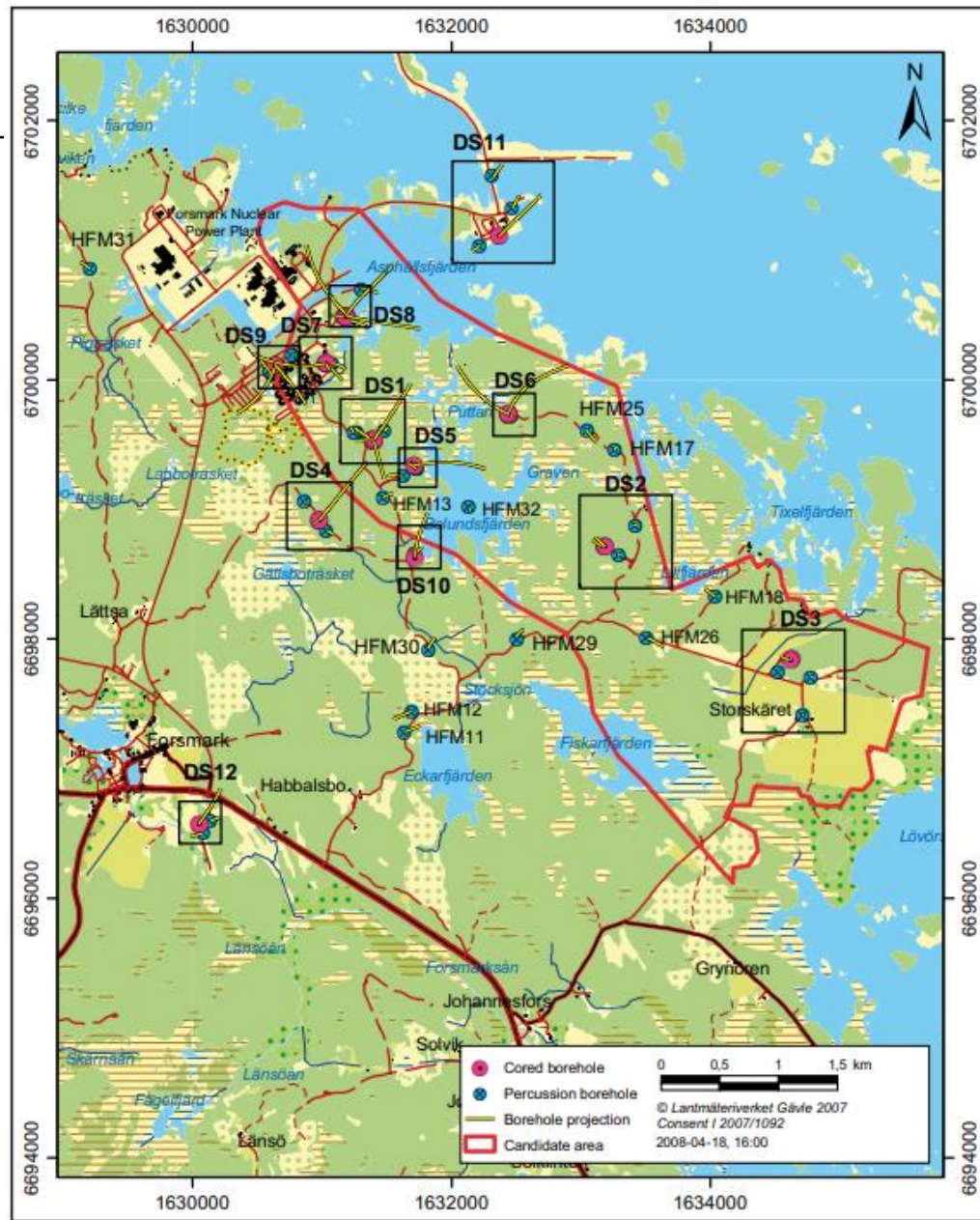
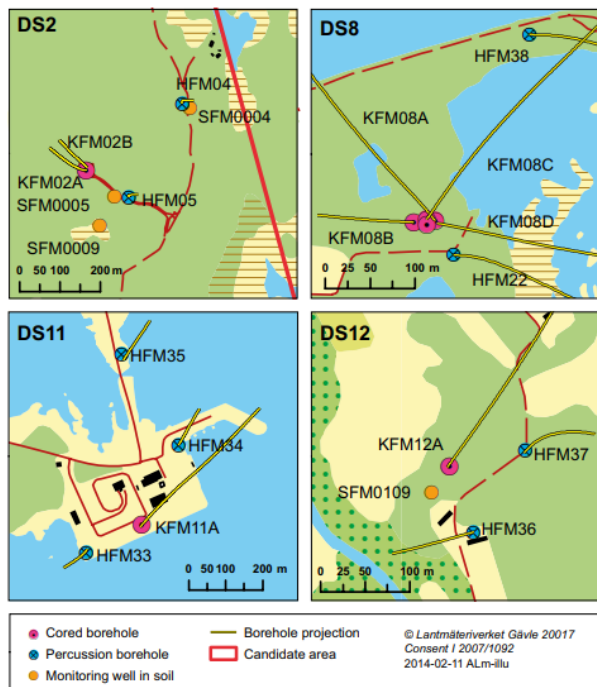


# 스웨덴의 부지조사 부지조사 모델 및 조사 요소



## • 포쉬마크 부지 시추위치

- 총 25개 시추코어  
(9개 > 1km) 시추공  
연장 18 km



# 스웨덴의 부지조사 부지모사 모델 및 조사 요소



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

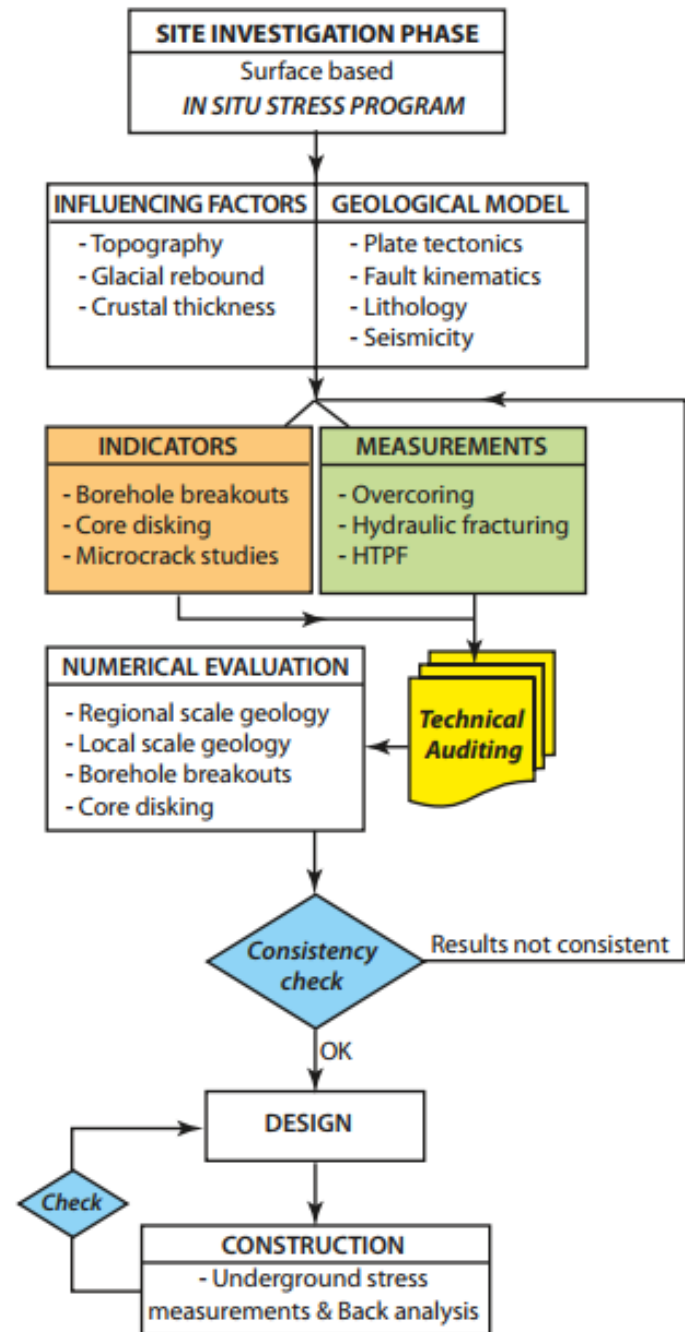
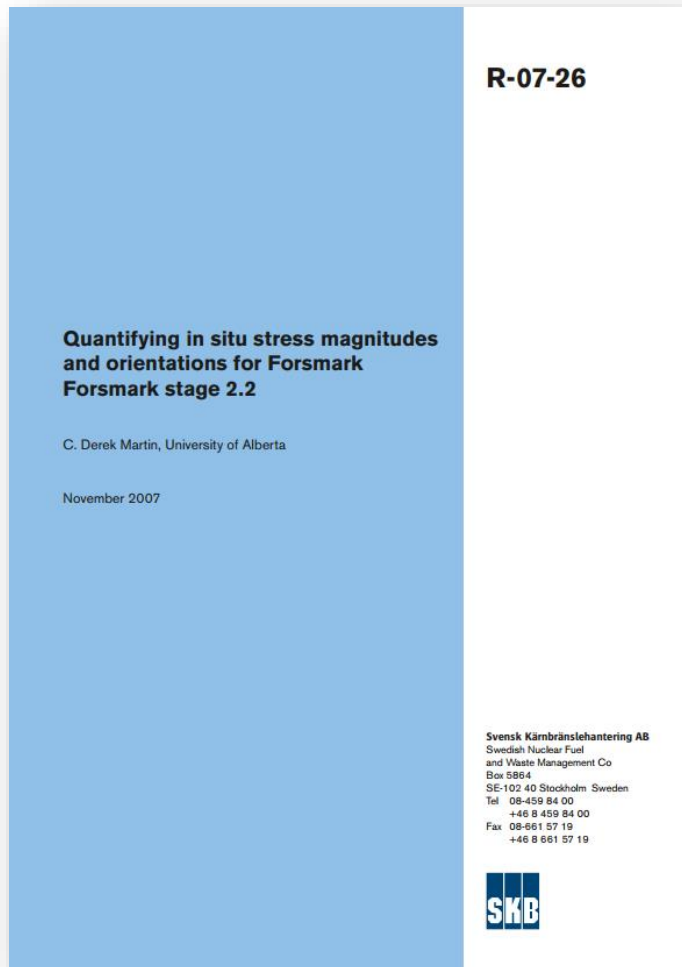
- 시추코어



KFM02A (lower part of DZ6)

# 스웨덴의 부지조사 초기응력(in situ stress)

## • 초기응력모델





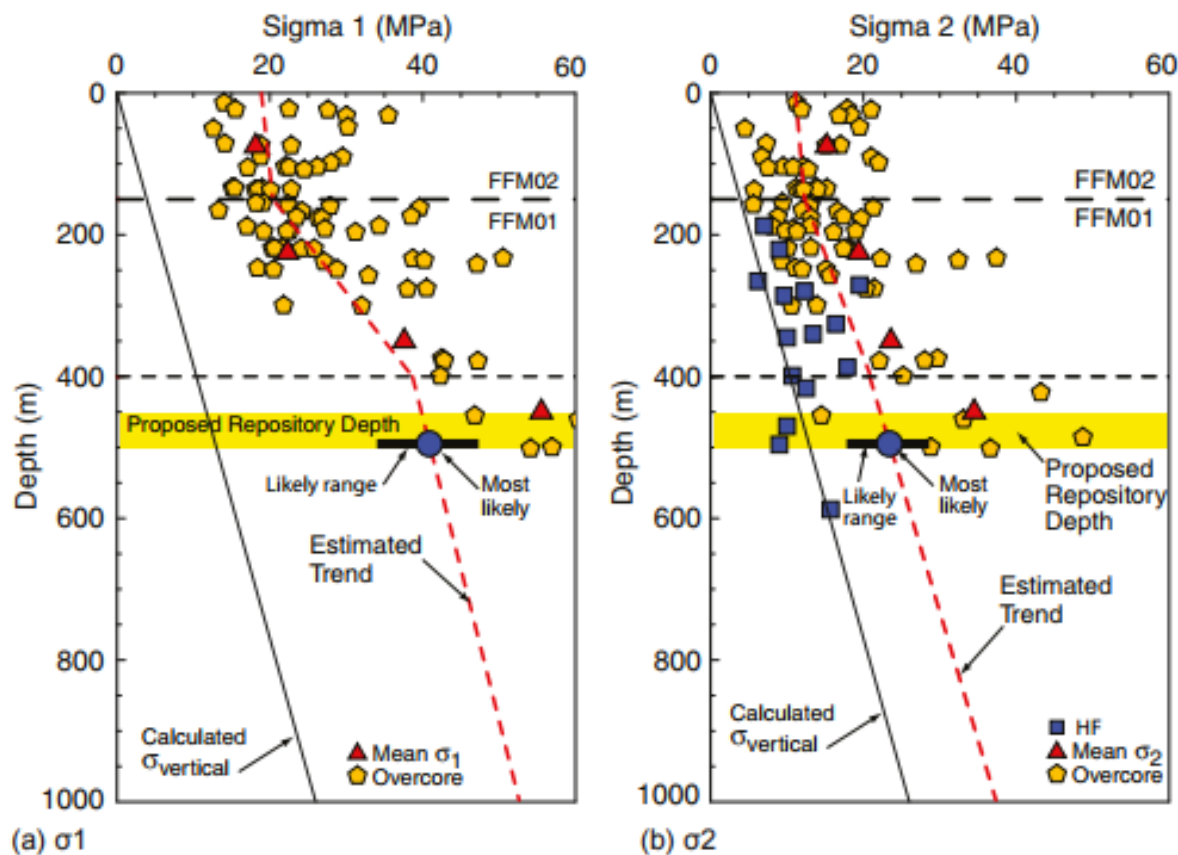
# 스웨덴의 부지조사 초기응력(in situ stress)



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 초기응력 모델

- 오버코링
- 수압파쇄



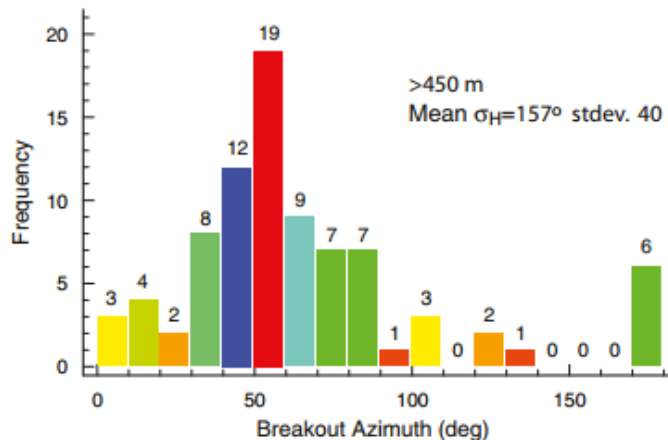
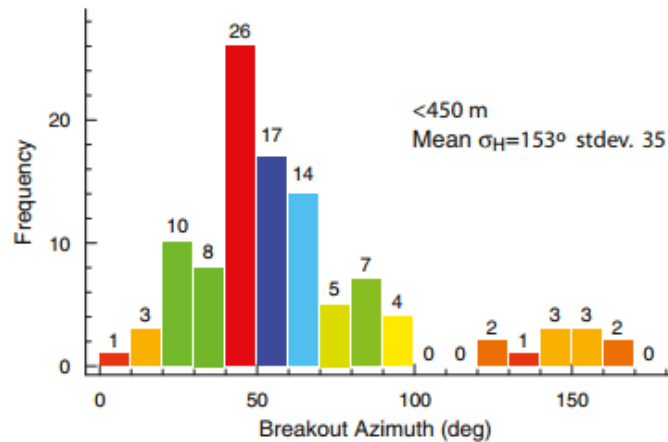
Depth range (m)	$\sigma_h$ (MPa)	Trend (°)	$\sigma_h$ (MPa)	Trend (°)	$\sigma_{vert}$ (MPa)
0–150	$19 + 0.008z, \pm 20\%$	$145 \pm 20$	$11 + 0.006z, \pm 25\%$	055	$0.0265z, \pm 0.0005$
150–400	$9.1 + 0.074z, \pm 15\%$	$145 \pm 15$	$6.8 + 0.034z, \pm 25\%$	055	$0.0265z, \pm 0.0005$
400–600	$29.5 + 0.023z, \pm 15\%$	$145 \pm 15$	$9.2 + 0.028z, \pm 20\%$	055	$0.0265z, \pm 0.0005$

# 스웨덴의 부지조사 초기응력(in situ stress)

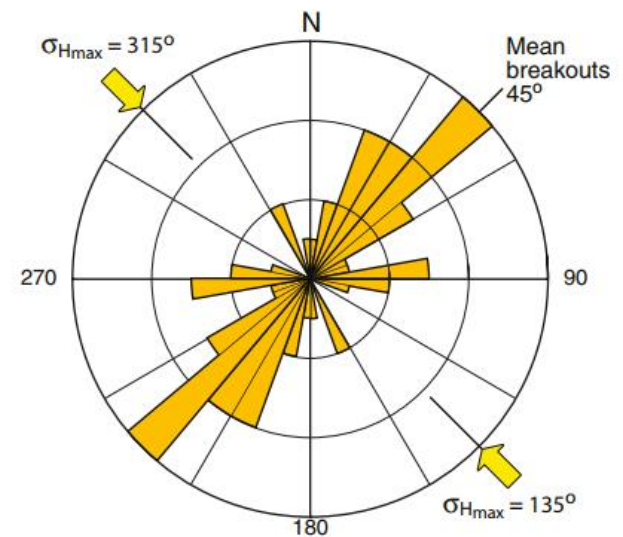


SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 공벽파괴(Borehole breakout)



Summary of the Ramboll breakout Azimuths identified above 450 m and below 450 m.

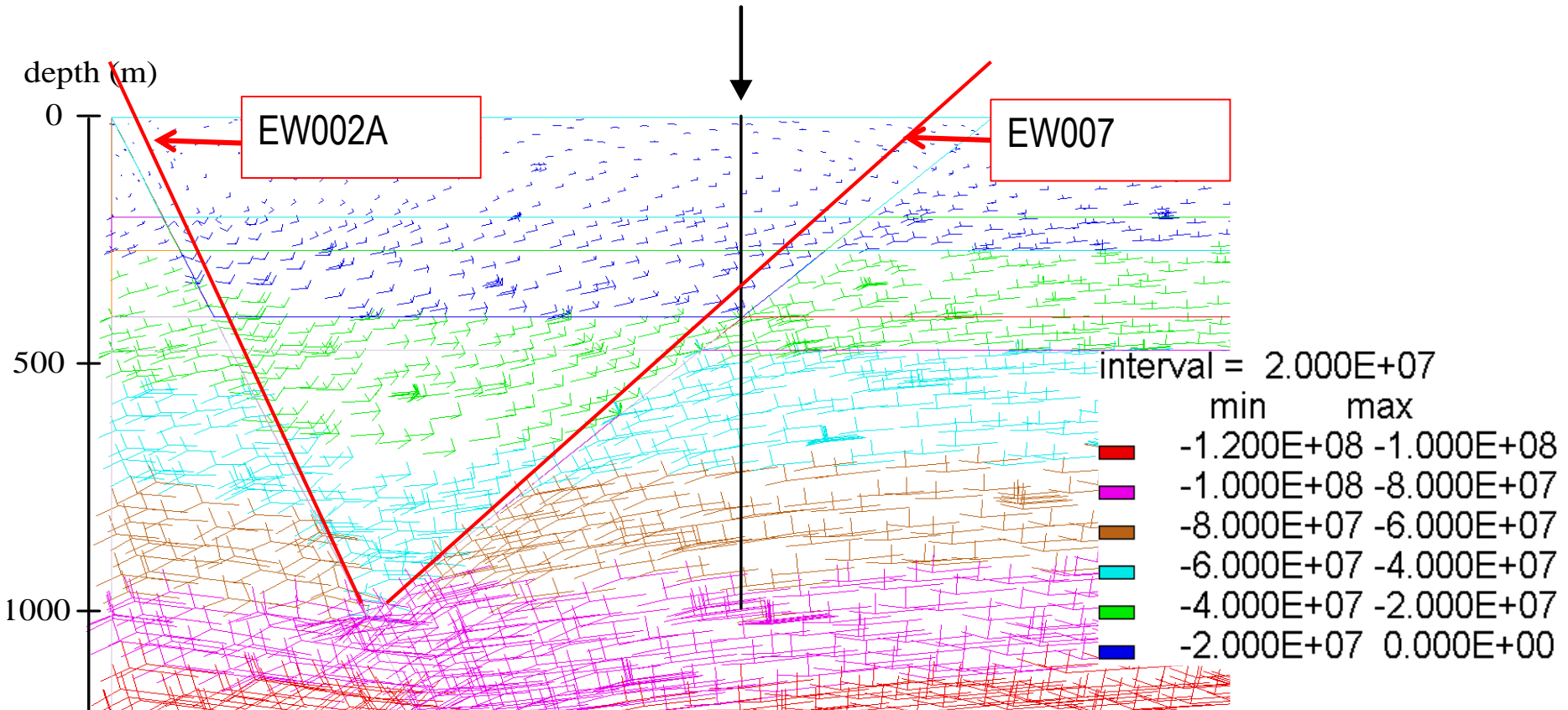
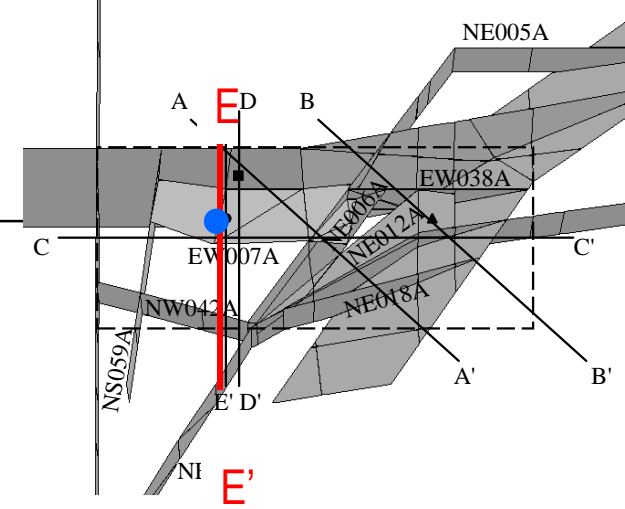


Rose diagram showing the orientation of the “classical” breakouts not associated with structure.

# 스웨덴의 부지조사 초기응력(in situ stress)

- 수치해석을 통한 초기응력 해석
  - 대규모 변형대를 통과하며 급격히 변하는 초기응력이 수치적으로 모사됨

KLX04

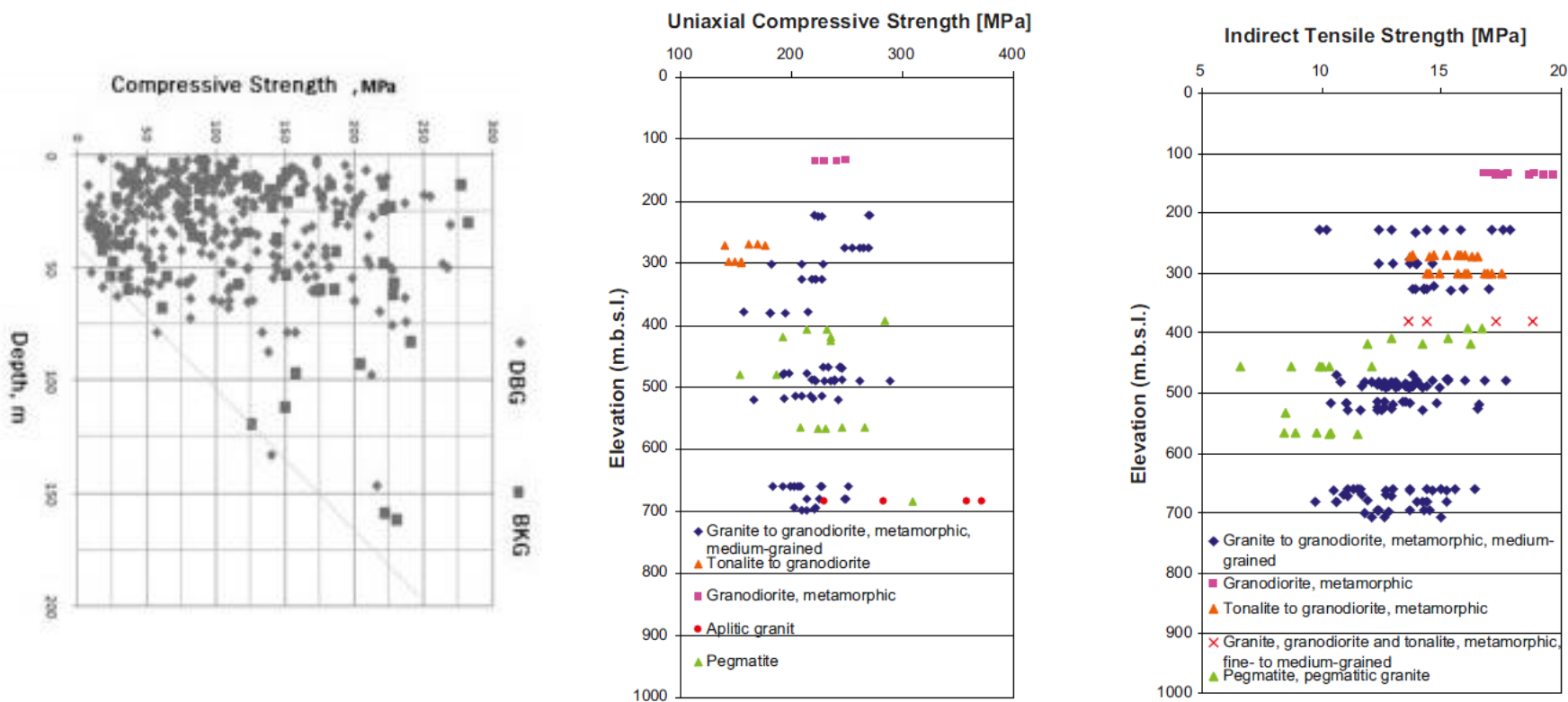


# 스웨덴의 부지조사 압축강도 및 인장강도



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 무결암(Intact rock)의 일축압축강도와 인장강도
  - 스웨덴(Forsmark)의 예



Glamheden, R., A. Fredriksson, K. Röshoff, J. Karlsson, H. Hakami and R. Christiansson, 2007, Rock Mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2, SKB R-07-31, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB)

선우춘, 류동우, 김형목, 김기석, 2011, 국내 화강암의 지반공학적 특성 및 암반분류법과의 상관성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제21권 제3호, pp. 205 ~ 215

# 스웨덴의 부지조사 균열의 물성



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 균열 팽창각 - 57 개의 균열

$$\sigma_n = 0.5 \text{ MPa}$$

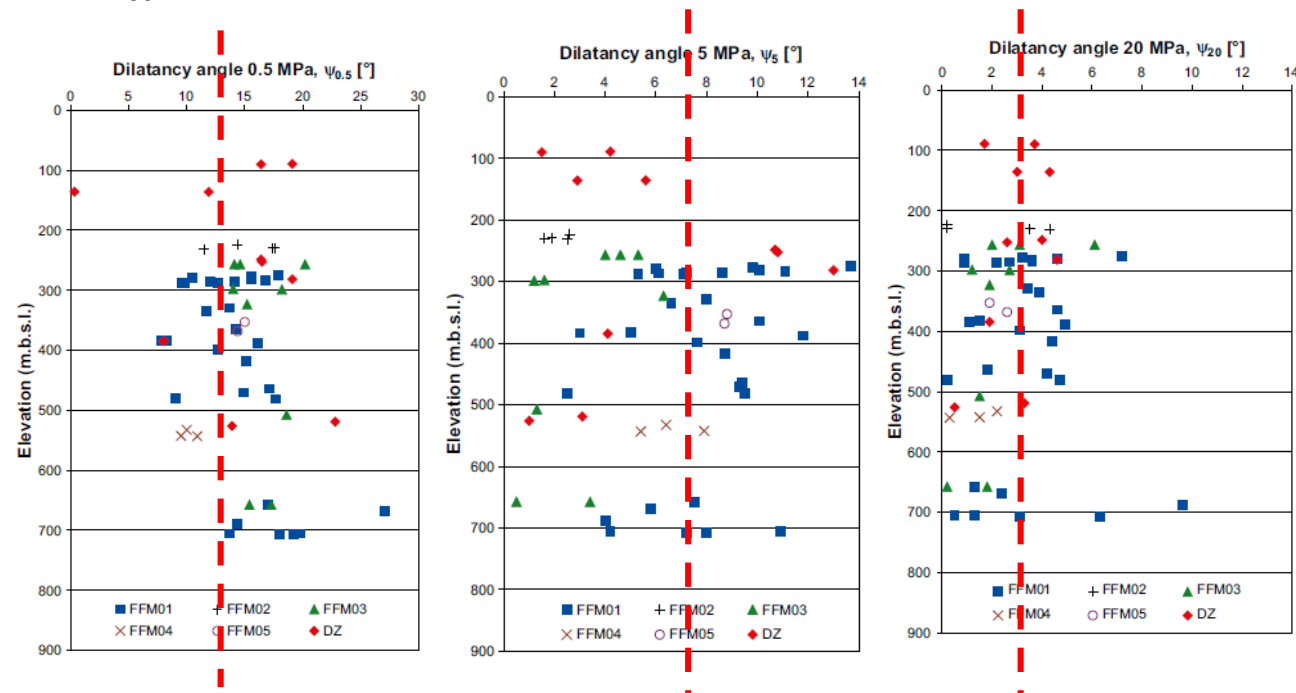
$$\Psi_{\text{mean}} = 14.6^\circ$$

$$5 \text{ MPa}$$

$$7.7^\circ$$

$$20 \text{ MPa}$$

$$3.2^\circ$$



Elmar & Stefan, 2010

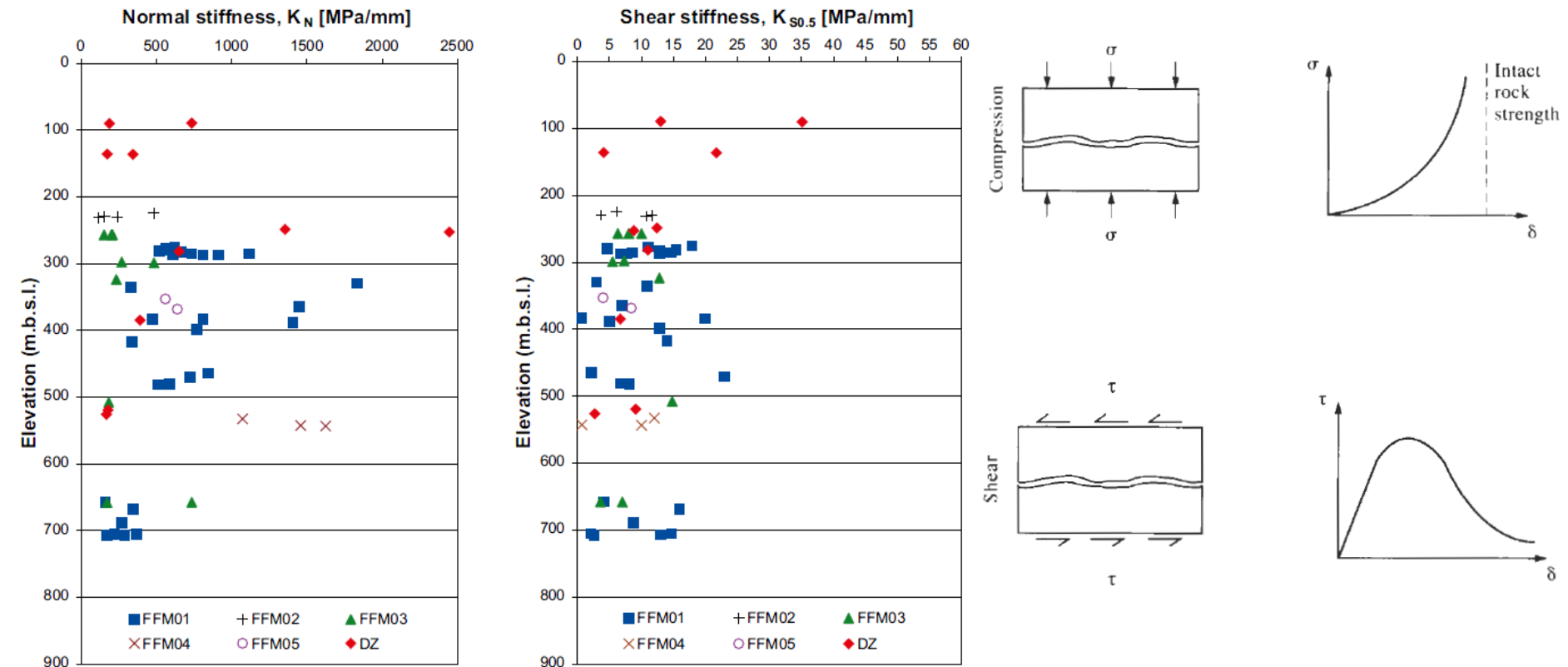
전단 팽창은 중요한 이슈 (~ 20 MPa, ~ 500 m)

# 스웨덴의 부지조사 균열의 물성



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 균열의 수직강성 및 전단강성



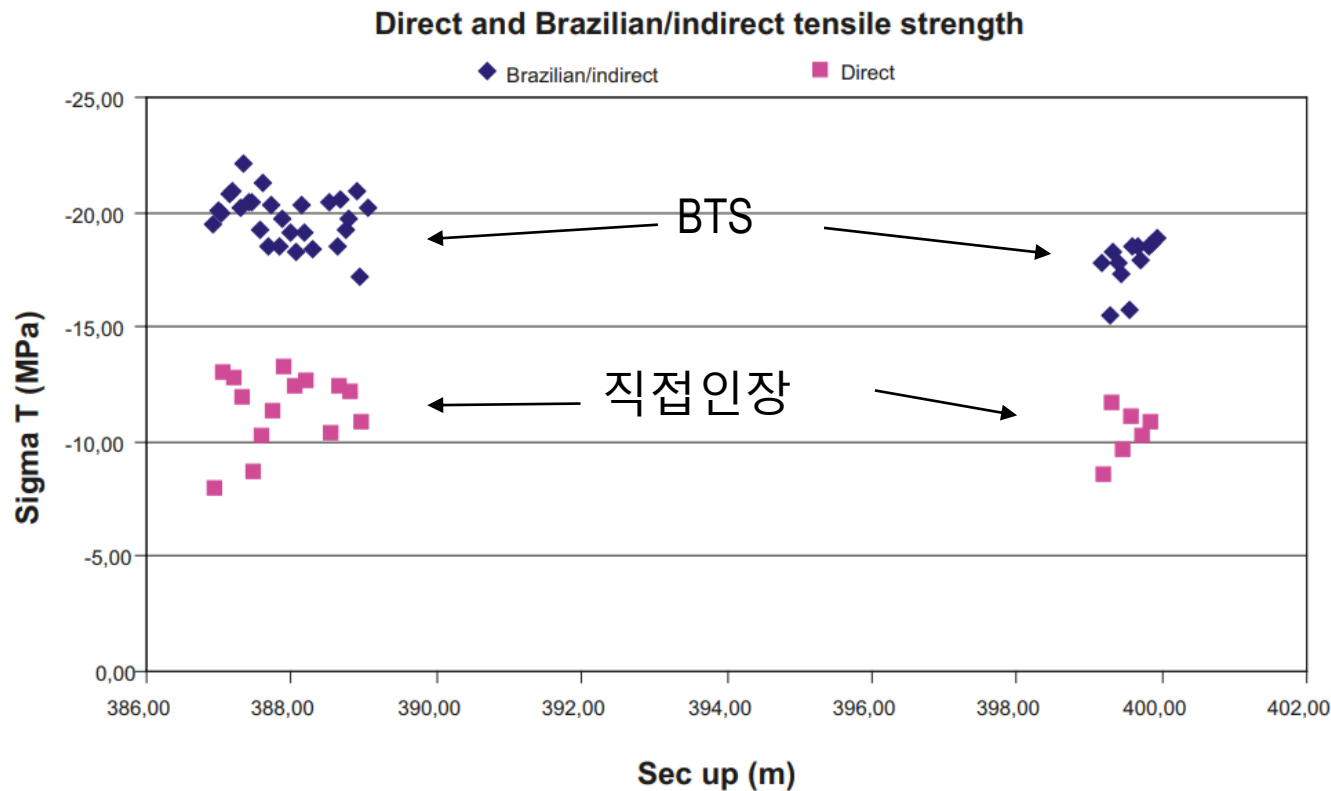


# 스웨덴의 부지조사 인장강도 관련 불확실성



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 직접인장강도와 브라질리언 간접인장강도 비교



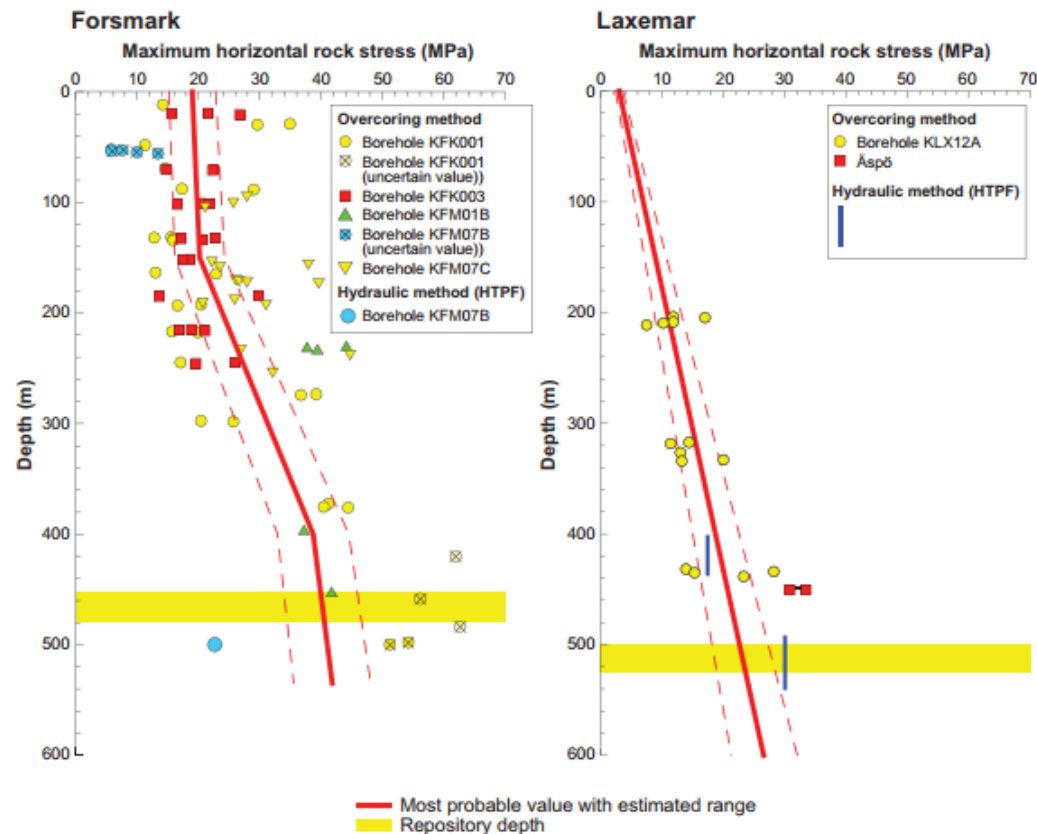
# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 초기응력

- 포쉬마크의 초기응력이 상대적으로 매우 큰 것으로 조사됨

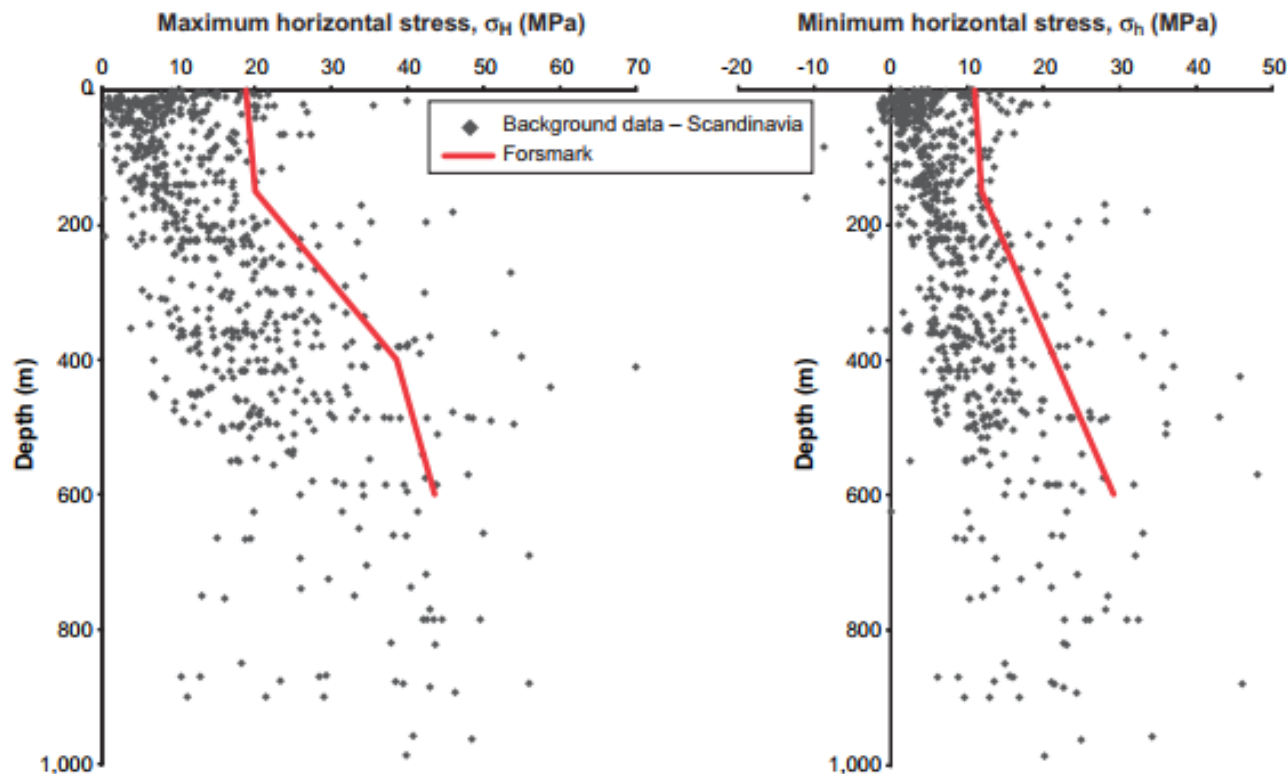


# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 초기응력 (스칸디나비아 지역의 자료와 비교)
  - 스칸디나비아 전체에 비해서도 초기응력은 매우 큰 것으로 조사됨



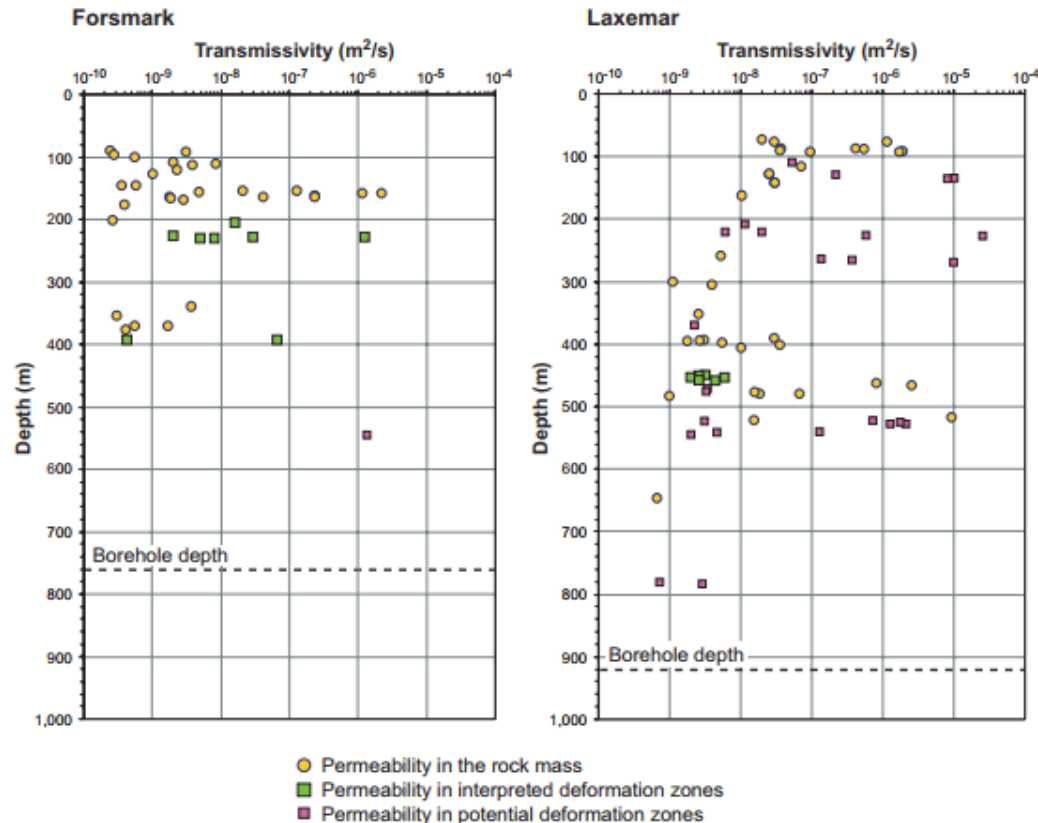
# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 투수량계수 (Transmissivity)

- 균열의 투수량계수는 포쉬마크가 락세마르에 비해 약 10-100 배 이상 낮아 우위



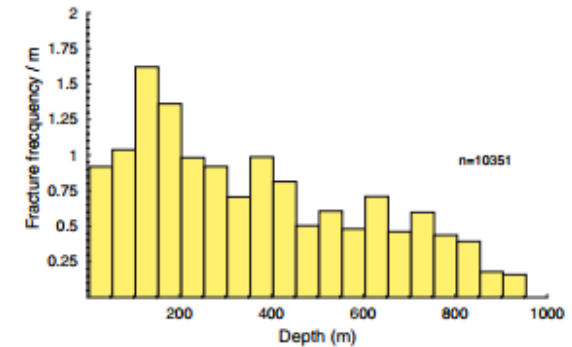
# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

\*절리. 파쇄대는 50/m 로 가정

- 열린 절리\*빈도(심도 400-700 m 구간)
  - 포쉬마크가 락세마르보다 5배 이상 낮은 균열 빈도를 가짐



(a) All open fractures.

열린 균열(BIPS 검층, 포쉬마크)

Area	Fracture frequency (open fractures metres)
Forsmark	0.6 ←
Kamlunge	2.5
Gideå	3.6
Svartboberget	2.4
Finnsjön	6.8
Fjällveden	1.6
Klipperås	4.1
Sternö	0.8
Äspö	3.4
Laxemar	3.1 ←



수평 및 수직 균열 (입구 부근, 포쉬마크)

# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 열전도도

- 포쉬마크가 열전도도( $\sim 3.5 \text{ W/mK}$ )가 락세마르( $\sim 2.8 \text{ W/mK}$ )에 비해  $>20\%$  이상 높은 값을 가져 우위

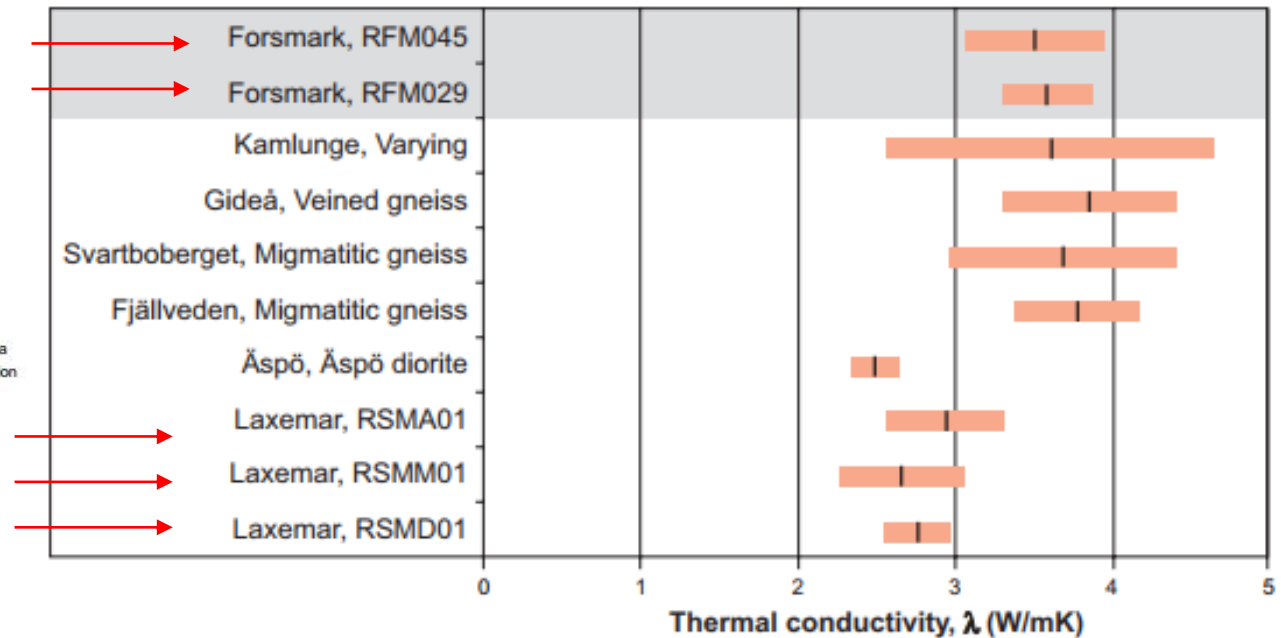


Figure 8-2. Data on thermal conductivity from Forsmark, Laxemar and reference areas (see /Winberg 2010/ for references).



# 최종 부지 결정을 위한 검토

## Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

- 비기술적 요인

- Laxemar는 아래 시설과 가까워 더 우위에 있음
  - ☞ 사용후 핵연료 중간저장시설(CLAB)
  - ☞ Äspö 지하연구실
  - ☞ 용기제작 시설(encapsulation plant, Simpevarp)

# 최종 부지 결정을 위한 검토 Forsmark vs Laxemar



SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

## • 정보의 투명한 공개

The image shows the SKB Publications search interface. It features a red header with the SKB logo and a search bar. Below the header, there are filters for 'Publications' and 'Quantity'. A search bar with 'Search SKB' is present. Below the search bar, there are filters for 'Report number', 'Title', and 'Author'. A 'Full text search' bar is also available. A 'Limit search to' section includes dropdowns for 'Series/publication type', 'Language', 'From year', and 'To year'. A 'Sort by' section includes a dropdown for 'Publication date' and a 'Sorting order' dropdown set to 'Descending'. The number of hits is 5187. A 'Show collapsed view' link is present. A 'SEARCH' button is located at the bottom right of the search filters.

The image shows a screenshot of the Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority) website. The header includes the organization's name and logo. The main content area features a 'Live webcast of hearing and presentation' section, which includes a video player and a list of topics: geology, rock mechanics, hydraulic processes, (bio) geochemistry, hydrochemistry. A sidebar on the right contains 'Links' to various resources. The bottom of the page shows a video player with the 'bambuser' logo.

- SKB 는 > 5,000종(2023년 3월 현재)의 보고서를 인터넷에 공개
- SSM (스웨덴 방사선 안전청, 규제 기관)은 각종 공청회 및 발표 등을 생중계

- 사용후핵연료 심층처분은 현세대의 책임에 관한 우리사회 모두의 문제임
  - 원자력 유지(스웨덴)/원자력발전소 추가건설(핀란드) 국가 모두 처분장 건설 결정
- 심층처분장의 부지 조사는 현존 최고의 국내외 기술을 바탕으로 심도 깊게 실시할 필요 있음
  - 요소 기술 및 생태계 확보 (초기응력측정, 암반균열망 조사, 고급 암석역학 시험)
- 투명한 정보공개 (개념에 포함된 불확실성을 포함)가 신뢰확보의 우선적인 조건
  - 투명한 정보 + 주민의 비토(VETO) 권리 + 규제기관
- 스웨덴은 지질 및 암반에 관련된 기술적 요인이 사회인프라 및 운반 등과 같은 사회적요인에 우선한 사례임.

- 본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 고준위폐기물관리차세대 혁신기술 개발 사업의 지원(과제번호: NRF-2021M2E3A2044264)을 받아 수행된 연구사업입니다.
- 자료 취합에 도움을 준 서울대학교 박사과정 윤정환 군에게 감사드립니다.